JUNI 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> EINSTEIN-SERIE:



Brownsche Bewegung



> Wie entscheide ich richtig?

> Umweltgifte aus der Natur

> Wirbel in der Tiefsee

www.spektrum.de

TISSUE ENGINEERING

Heilung nach dem Herzinfarkt

Forscher züchten neue Muskeln im kranken Herzen

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €



SCHWERPUNKT

Wasserstoff
Die teure Zukunftsenergie

PHYSIK

Heiße Tieftemperatur-Supraleiter

GEDÄCHTNIS

Musik manipuliert Hirnneuronen



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Schwere Entscheidungen mit hohem Risiko

Jeder gerät immer mal wieder in die Lage, eine Entscheidung treffen zu müssen, von der viel abhängt: vielleicht nur der künftige Wohlstand, manchmal aber sogar das weitere Leben. Auch für Gesellschaften gilt das, nur fallen Entscheidungen dann nicht über Nacht, sondern eher innerhalb von Jahrzehnten. Mit Entscheidungen tut man sich vor allem dann schwer – das wird jeder schon mal schmerzlich erlebt haben –, wenn die Informationen unvollständig, die Risiken hoch oder die Regeln unklar sind. Es ist nicht offensichtlich, wie einem dabei die Mathematik helfen kann.

Doch F. Thomas Bruss analysiert seit Jahren genau solche Entscheidungsprobleme. Der mathematische Statistiker von der Université Libre de Bruxelles ist regelmäßigen Spektrum-Lesern einschlägig bekannt: als Autor mehrerer »Mathematischer Unterhaltungen«, zuletzt vom Mai 2004.

Als besonderes Beispiel führt Bruss klinische Versuche an: Wie lange oder an wie vielen Patienten sollen Mediziner ein neues Medikament testen? Wann soll eine Serie aussichtsreicher, aber risikanter Behandlungen abgebrochen werden? Solche Fragen konfrontieren Ärzte mit Abwägungsproblemen. Auch Politiker und Manager sind mit ähnlichen Dilemmata vertraut: Man will sein Pulver nicht zu früh verschießen; aber wer zu spät reagiert, verpasst womöglich die letzte Gelegenheit, die es überhaupt noch gab.

Wer zu spät reagiert, verpasst womöglich die letzte Chance

Bietet Mathematik die Lösung? »Eine mathematische Strategie«, notiert Bruss in seinem Beitrag über Entscheidung und Verantwortung, »kann kein Wundermittel sein.« Doch hilfreich schon. Spektrum-Redakteur Christoph Pöppe, ebenfalls ein gelernter Mathematiker, suchte den Entscheidungstheoretiker in seinem Institut in Brüssel auf und fragte ihn, ob er auch selbst schon mal von seinen Theorien profitiert habe. Seine Antwort blieb sibyllinisch: »Ja, einige Male.« (S. 78)

Langfristig hat die irdische Zivilisation nicht wirklich die Freiheit zu entscheiden, ob sie ihre Energie- und Mobilitätssysteme einmal auf Wasserstoff umstellen wird. Kurz- und mittelfristig natürlich schon, denn die Höhe des Aufwands wird zumindest das Tempo beeinflussen, mit dem wir die Technologie vorantreiben und so mit dem versiegenden Ölstrom zurechtkommen werden. In unserem Schwerpunkt »Wasserstoff« berichten wir über wesentliche Chancen und Risiken dieses Energieträgers. Am weitesten gediehen scheinen dabei schon die mobilen Anwendungen in Bussen und Pkws – relativ gesehen. Trotz diverser Testfahrzeuge auf den Straßen bedarf es offenbar noch einiger Technologiesprünge und gewaltiger Infrastrukturmaßnahmen, um Wasserstoffvehikel zum massentauglichen Alltagsgerät zu machen (S. 98).

Umso mehr ist ein realistischer Blick auf die Perspektiven geboten. Doch Bernd Müller, freier Technikjournalist, hält die Wasserstofftechnik für »auf absehbare Zeit unwirtschaftlich« und sieht »zunächst wenig Entlastung für die Umwelt«. Dass ausgerechnet mangelnde Umweltverträglichkeit dabei zum Problem werden könnte, hat mich überrascht, läuft es doch gängigen grünen Utopien völlig zuwider. Offenbar ist dem Umweltaspekt in der bisherigen Debatte um eine »saubere« Wasserstoff-Zukunft deutlich zu wenig Beachtung geschenkt worden. Bei so viel Unsicherheit sollten wir uns zumindest entscheiden, uns schneller zu entscheiden (S. 86).

JUNI 2005

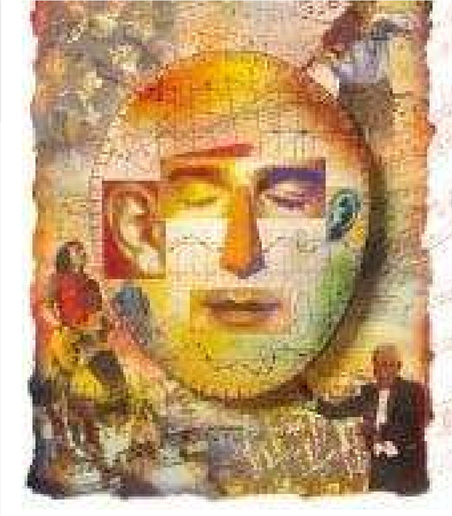
SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Oft folgt dem Herzinfarkt nach einigen Jahren eine Herzinsuffizienz. Die kranke Herzwand wird überdehnt. Im Labor gezüchtete Muskulatur soll dem weiteren Verfall vorbeugen
Grafik: Corbis

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 30

HIRNFORSCHUNG

Musik – eine Liebe des Gehirns

Unser Gehirn scheint für Musik wie geschaffen. Viele verschiedene Hirnregionen spielen dabei mit. Die Neuronen reagieren auf musikalische Klänge erstaunlich plastisch – und bei Musikern teils hochspezifisch

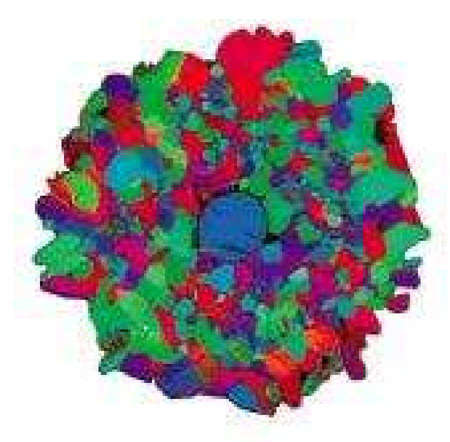


SEITE 38

CHEMIE

Natürliche Umweltgifte

Die Natur steht der chemischen Industrie in der Produktion von Halogenverbindungen, dem Inbegriff für umweltschädliche Stoffe, nicht nach. Manche der Substanzen sind aber auch medizinisch wertvoll



SEITE 56

SUPRALEITUNG

Neuer Rekordhalter

Magnesiumdiborid ist ein herkömmlicher Supraleiter – oder doch nicht? Jedenfalls hat die Eigenschaft dieser einfachen Verbindung, Strom bereits bei 40 Kelvin verlustfrei zu leiten, die Wissenschaftler elektrisiert



SCHWERPUNKT WASSERSTOFF SEITE 86

Die teure Zukunftsenergie

Geldvernichtungsmaschine oder probates Mittel gegen Treibhauseffekt und Ölknappheit? An der Vision einer globalen Wasserstoffwirtschaft scheiden sich die Geister. Doch Forscher warnen: Wenn Politik und Wirtschaft nicht jetzt die ersten Schritte wagen, ist die Chance vertan





TITELTHEMA HERZINFARKT — SEITE 48

Hilfe durch Muskelimplantat

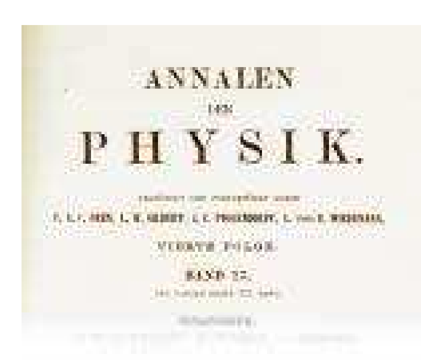
Gewebeingenieure konstruieren im Labor Herzmuskulatur mit dem Ziel, nach einem Herzinfarkt das geschädigte Gewebe zu ersetzen und einer schleichenden Insuffizienz vorzubeugen. Damit in dem Implantat zugleich Blutgefäße wachsen, benötigen die Zellen eine künstliche Matrix

SEITE 66

GESPRÄCHE UM EINSTEIN (IV)

Brownsche Bewegung

Der Marburger Physiker Siegfried Großmann erläutert, wie Albert Einstein 1905 die Vorstellung vom molekularen Aufbau der Körper festigte und einem Spezialgebiet – der statistischen Physik – zu neuem Auftrieb verhalf



ANNALEN
PHYSIK.
VIERTE FOLGE.

SEITE 78

MATHEMATIK

Entscheidungen unter Unsicherheit

Ein neues und einfaches mathematisches Verfahren ist beweisbar optimal. Wer es anwendet, ist nicht unfehlbar, aber er maximiert die Erfolgswahrscheinlichkeit – und ist gegen spätere Vorwürfe abgesichert



JUNI 2005

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Heilsame Stichproben

Die Akupunktur ist eine der ältesten und weltweit beliebtesten Therapieformen. Während die Nachfrage nach der sanften Alternative weiter steigt, streiten Wissenschaftler noch über ihre Wirkung

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Laufende Menschwerdung

Springers Einwürfe, 2/2005

Das Laufen als Ursache für den entsprechenden »Fortschritt« in der Menschwerdung erkennt man bereits im Wort selbst. Entsprechend bezeichnet die antike »Peripatetik« (das Umherwandeln) eine wissensschaffende Arbeitsweise, welche in geeigneten Wandelhallen erfolgte.

Dass dagegen wissenschaftliche Fortschritte heutzutage auf »Sitzungen« erzielt werden müssen, scheint allerdings ein weit verbreiteter »Irrweg« zu sein. Bereits vor einigen Jahren erreichte mich durch SdW ein Untersuchungsergebnis, nach dem der Neokortex bei leichter Bewegung um einige Prozent besser durchblutet wird. Geht die zunehmende Mobilität der Gesellschaft somit vielleicht einher mit einem weiteren Schub in der Menschwerdung? – »Homo movens« sozusagen. Zu wünschen wär's!

Dr. Karsten Löhr, Ulm

Tsunami-Katastrophe

Schlaglicht, Februar 2005

Der Artikel erklärt nicht die hohe Geschwindigkeit der Tsunamiwellen von mehreren hundert Kilometern pro Stunde. Entscheidend hierfür ist, dass die durch das Erdbeben in das Wasser eingebrachte Energie durch eine Druckwelle und nicht durch Oberflächenwellen weitergeleitet wird. Man muss berücksichtigen, dass Wasser elastisch kompressibel ist, wenn auch nur in geringem Maße. Aber gerade das ist die Ursache für die hohe Geschwindigkeit, da hierdurch eine hohe Rückstellkraft gegeben ist. Eine Schwingung pflanzt sich umso schneller fort, je steifer das schwingende Medium gegen die Auslenkung ist.

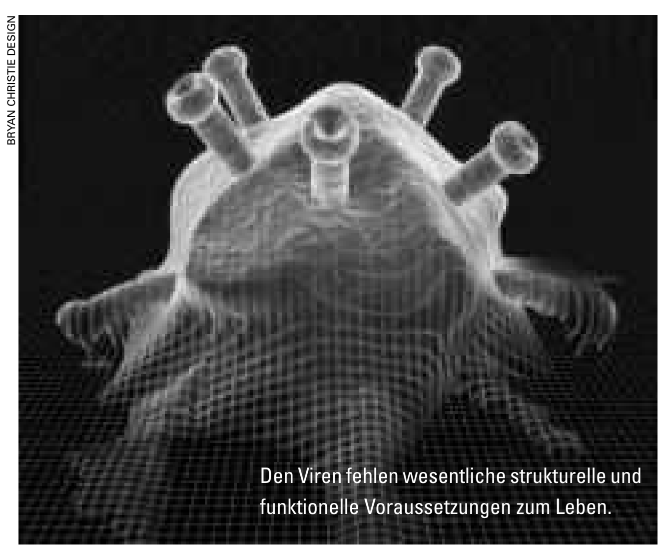
Im Gegensatz zu den langsamen, transversalen Oberflächenwellen, bei denen als Rückstellkraft nur die vergleichsweise geringe Schwerkraft wirkt, handelt es sich bei den schnellen Druckwellen um longitudinale Wellen. Der Energietransport durch das Wasser mittels der Druckwelle verläuft wegen der geringen Bewegung auch relativ verlustarm – mit der Folge hoher Energiedichte an den Stränden, wo die Welle sich zerstörerisch austobt. Bei der Annäherung an den Strand konzentriert sich die Schwingungsenergie entsprechend der geringer werdenden Wassertiefe auf ein immer kleiner werdendes Wasservolumen.

Dr.-Ing. Peter Lengler, Duisburg

Leben Viren?

Februar 2005

Der Vergleich von Viren mit pflanzlichen Samen kann nicht unwidersprochen bleiben. Leben ist an hochgradige Ordnung in zellulären Strukturen und Ablaufmechanismen von Prozessen gebunden. Ihr Bestand ist aus thermodynamischen Gründen äußerst unwahrscheinlich. Er wird durch ständigen hohen Energieeinsatz gesichert. Viren fehlen dafür entscheidende Voraussetzungen, während Samen darüber verfügen.


BRYAN CHRISTIE DESIGN

Den Viren fehlen wesentliche strukturelle und funktionelle Voraussetzungen zum Leben.

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Selbst bei nur 10 Prozent Wassergehalt im ruhenden Samen gibt es Atmung und Stoffverbrauch zur Erhaltung des Lebenszustands. Quellung in Wasser genügt, um zu voller Lebensaktivität zurückzukehren.

Dies trifft auf Viren nicht zu. Ihr Bestand hat sich in der Koevolution mit lebenden Zellen derart entwickelt, dass sie wie analoge zelleigene Komponenten erkannt, in die zellulären Lebensprozesse einbezogen und Letztere auf die Replikation des viralen Nukleoproteinkomplexes gerichtet werden. Dieser reorganisiert sich aus seinen Bausteinen, verfügt aber nicht über die strukturellen und funktionellen Voraussetzung zum Leben.

Beim häufigen Wechsel zwischen nicht lebendem Bestand außerhalb von Zellen und Integration in die Ordnung von zellulären Lebensvorgängen erfolgt gelegentlicher Austausch von genetischer Information, die bei Passfähigkeit ins zelluläre System zu dessen beschleunigter Evolution beiträgt.

Prof. Klaus Müntz, Gatersleben

Die Zwerge von Flores

März 2005

Gebetsmühlenartig wird in der Paläoanthropologie die Behauptung wiederholt, für koordinierte Gruppenjagd brauche es menschliche Sprache – so auch in Ihrem Beitrag. Mag sein, dass *Homo erectus* und andere archaische Menschenformen schon Sprache besaßen, doch dass sie jagten, kann kein Argument dafür sein. Wölfe, Löwen und Schimpansen jagen erfolgreich in koordinierten Gruppen, ohne eine syntaktische Sprache zu besitzen. Auch moderne Menschen unterhalten sich eher woanders als ausgerechnet auf der Jagd.

Dr. Ruth Berger, Frankfurt

Antwort des Prähistorikers Dr. Hartmut Thieme, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

Ebenso »gebetsmühlenartig« wird »koordinierte Gruppenjagd« des frühen Menschen mit der Jagd in koordinierten Gruppen bei Wölfen und Löwen verglichen oder gleichgesetzt. Und so wird der frühe Mensch als Raubtier mit genetisch verankertem Jagdprogramm gekennzeichnet – als gäbe es die urgeschichtliche Archäologie nicht mit ihren zahlreichen Belegen zum hohen technologisch-kulturellen Niveau bereits zur Zeit des *Homo erectus* (siehe die Ergebnisse zu Bilzingsleben und Schöningen in SdW, Oktober 2004).

Jagd zu jener Zeit ist eine kulturelle Erscheinung mit technologischen Mitteln, wozu auch Lanzen, Speere, Feuer (und Fallen) sowie diverse steinerne Spezialwerkzeuge zur Zerlegung/Nutzung des erlegten Wilds dienen. All


Natürliche Brutplätze für den Mauersegler sind rar geworden.

PHILIPPE HENRI, CHAUMONT-SUR-LOIRE

diese Tätigkeiten sind mit Planung, überlegter vorheriger Absprache und Koordination mittels Sprache verknüpft und in Rückkopplung mit allen übrigen Elementen der Kultur verwoben.

Mauersegler

April 2005

Da die natürlichen Brutmöglichkeiten heute weit gehend ausfallen, ist der Mauersegler mehr denn je auf Nistplatzangebote in Gebäuden angewiesen. Hier noch drei Tipps:

1. Mauersegler benötigen mindestens 6 Meter hoch gelegene, im freien Anflug erreichbare Höhlungen im Mauerwerk und unter Dächern, die an entsprechender Stelle auch durch selbst gebaute Nistkästen ersetzt werden können. Allerdings sollten diese mit etwa 50 mal 30 Zentimeter Innenmaß (Höhe 10 bis 15 Zentimeter) den Jungvögeln ausreichend Platz bieten, um ihre Flügel zu strecken und ihre Brustmuskeln dadurch für den »Sturzflug in die Selbstständigkeit« zu trainieren. Schon heranwachsende Segler spannen gut 40 Zentimeter und mehr.

2. Gerüstarbeiten sollten so auf die Brutperiode abgestimmt werden, dass die von den Vögeln genutzte Seite vor oder nach der Saison in Angriff genommen wird oder zumindest die oberste Gerüstlage während dieses Zeitraums wegbleibt. Ist das nicht möglich, halte ich es immer noch für besser, die Quartiere für den kritischen Sommer zu verschließen und die Segler am Brüten zu hindern, damit keine Jungvögel verhungern.

3. Mit dem Kauf biologisch erzeugter Landwirtschaftsprodukte und naturnahen Gärten kann jeder sich für eine Umwelt einsetzen, von der auch der Mauersegler profitiert.

Weitere Informationen erhalten Sie über das Internet www.lbv-muenchen.de. Dort finden Sie unter »Arbeitskreise« auch den Link zu Mauerseglern.

Anton Vogel, München

Doppelt zählt besser

Zukunft der Computer, 3 / 2005

Für mich ist es eine schon lange erwartete Wende zu MultiCore. Leider gibt es kaum dafür ausgebildete Menschen, teilweise wurden MultiCore-Pioniere auf die Straße gesetzt, vom »Wintel«-Hype überrollt.

Wieder einmal zeigt sich, dass kurzfristiges Agieren unbefriedigend ist. Unerlässlich ist die Ausbildung von Ingenieuren, die entsprechende Grundlagen erforschen, Konzepte erstellen und Systeme so entwickeln, dass Hardware und Software entstehen, die optimal, ressourcensparend, wiederverwendbar, skalierbar und pflegeleicht sind.

Zu guter Letzt: Ein »ordentlich« konzipiertes und realisiertes MultiCore-System ist viel übersichtlicher und wirtschaftlicher als alles, was per Pipeline, Cache, Hyper-Theading et cetera im GHz-Takt läuft und zudem Unmengen an Strom verbraucht.

Manfred Helzle, Blaustein-Wippinge

Appetit auf Dinos

Forschung aktuell – April 2005

Sie beschreiben hier die Versteinerung des Säugetiers *Repenomamus robustus*. In der Abbildung seines großen Verwandten ist bei der Skalierung wahrscheinlich ein Fehler unterlaufen.

Die Hypothese, dass es sich bei *Repenomamus robustus* nicht um Aasfresser handelt, wird sehr leichtfertig verworfen. Da sogar bei derartig großen Dinosauriern wie *Tyrannosaurus rex* diskutiert wird, ob es sich um Aasfresser handelt, können weder die Größe noch die dolchartigen Zähne als Indiz verwendet werden. Dolchartige Zähne finden sich heutzutage auch bei kleinen Insekten fressenden Säugetieren. Unter den heutigen Fleisch fressenden Säugetieren verzehren nicht nur zwei Hyänenarten, sondern auch Löwen und Schweine Aas.

Wie hat *Repenomamus robustus* nur die großen Knochenfragmente heruntergewürgt?

Dr. Roland Sterzel, Frankfurt

Anmerkung der Redaktion: Der Maßstab ist in der Tat falsch angegeben, es sind nicht 10, sondern 50 mm.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Corinna Gilley, Dr. Peter John, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson



▶ Die purpurrote Tinte der Seehasen verwirrt Fressfeinde mit verlockenden Geschmacksreizen.

VERHALTEN

Listige Seehasen

■ Seehasen der Art *Aplysia californica* überlisten ihre Fressfeinde durch den Ausstoß eines chemischen Cocktails, der nach leckeren Meeresfrüchten duftet. Das stellten Cynthia Kicklighter und Charles Derby von der Georgia State University in Atlanta fest, als sie die Meeresschnecken in ein Aquarium mit Langusten setzten. Diese sahen in den Weichtieren ein gefundenes Fressen und packten sie gierig. Doch anstatt sie zu verschlingen, ließen sie die Beute plötzlich wieder los und begannen verwirrt im Boden zu wühlen sowie ausgiebig ihre Fühler zu putzen – ähnlich wie sie auf einen Garnelenextrakt reagieren. Währenddessen konnte der Seehase in aller Ruhe das Weite suchen.

Ähnlich wie Tintenfische stößt *A. californica* bei der Begegnung mit Räubern eine – in diesem Fall purpurrote – Flüssigkeit aus. Doch damit versteckt sie sich nicht nur hinter einer dunklen Farbwolke. Ihr Sekret enthält auch einen milchig weißen Saft: eine Mixtur aus Harnstoff, Aminen, verschiedenen Aminosäuren und vor allem Taurin – einer Substanz, die auch in vielen Energy Drinks vorkommt. Die Mixtur überflutet die Langusten offenbar mit Geschmacksreizen, die ihre Sinne verwirren. Kicklighter und Derby sehen darin das erste Beispiel einer »Phagomimikry« (Fresstäuschung) als Abwehrstrategie gegen Feinde.

Current Biology, 29.3.2005, S. 549

ARCHÄOLOGIE

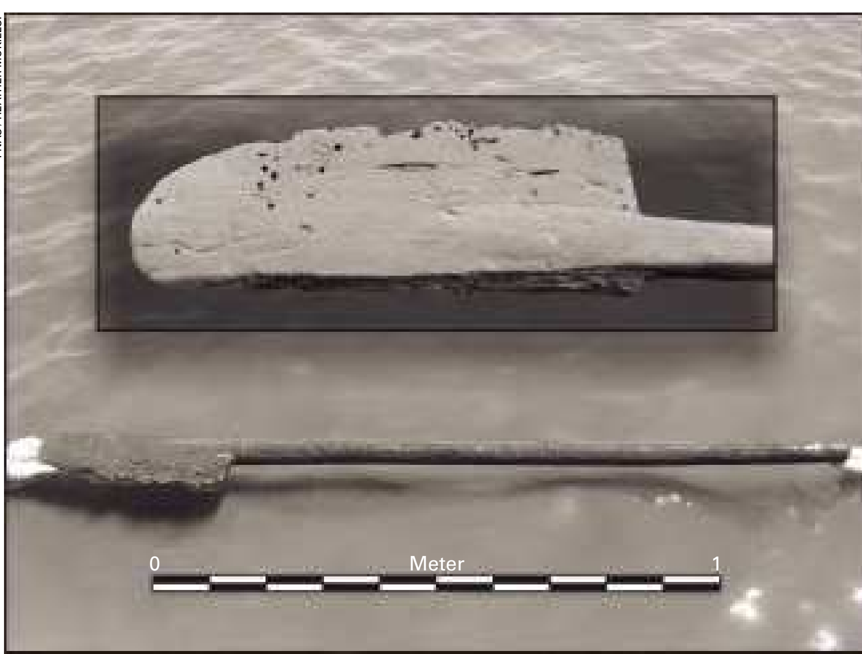
Das weiße Gold der Maya

■ Auch die Maya brauchten Salz zum Würzen ihrer Speisen. Da es innerhalb ihres Territoriums auf der Halbinsel Yucatán keine Salzlagerstätten gab, mussten sie das begehrte Gut notgedrungen aus dem Meer gewinnen.

Bisher waren allerdings nur vier Salinen bekannt – viel zu wenige, um den Bedarf zu decken. Deshalb machten sich Heather McKillop von der Louisiana State University in Baton Rouge und ihre Mitarbeiter vor der Küste der Lagune Punta Ycacos auf die Suche nach weiteren Anlagen. Tatsächlich stießen sie beim Schnorcheln im seichten Gewässer der Mangrovensümpfe an 41 Stellen auf Spuren ehemaliger Salzwerke: Reste von Holzhütten und Scherben von Tongefäßen, die zur Salzgewinnung dienten. Wie Radiokarbondatierungen des Holzes und stilistische Vergleiche der Keramik zeigten, stammen die Fundstücke aus der Zeit von 600 bis 900 n. Chr.

Nach der Art der Anlagen und Tongefäße zu urteilen, ließen die Maya das Meerwasser nicht von der Sonne eindunsten, sondern verdampften es über Holzkohlefeuern. In die fernen Städte im Landesinneren wurde das Salz dann vermutlich auf dem Wasserweg per Kanu transportiert. Darauf deutet der sensationelle Fund eines hölzernen Paddels in einer der Salzfabriken hin.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 12.4.2005, S. 5630



PNAS / HEATHER MCKILLOP

◀ Der Fund dieses hölzernen Paddels legt nahe, dass die Maya das Meersalz auf dem Wasserweg ins Landesinnere transportierten.



GENNY ANDERSON, SANTA BARBARA CITY COLLEGE, USA

PSYCHOLOGIE

Essen nach Augenmaß

Das Auge und nicht der Magen bestimmt offenbar, wann wir satt sind. Das haben amerikanische Forscher mit einem ungewöhnlichen Versuch demonstriert. Brian Wansink von der Universität von Illinois in Urbana Champaign und seine Kollegen baten 54 Testpersonen zu einem Süppchen. Der Hälfte der Probanden schoben sie allerdings unbemerkt einen präparierten Teller unter. Während diese Testesser arglos löffelten, wurde durch einen versteckten Schlauch ständig Suppe nachgefüllt. Am Ende des zwanzigminütigen Mahls hatten die ausgetricksten Versuchspersonen 73 Prozent mehr Kraftbrühe zu sich genommen als ihre Kollegen mit normalen Tellern – was rund 113 zusätzlichen Kalorien entsprach.

Im Anschluss sollten alle Teilnehmer angeben, wie viel sie ihrer Meinung gegessen hatten und ob sie satt waren. Das überraschende Ergebnis: Beide Gruppen fühlten sich gleich gesättigt, und keiner der getäuschten Probanden hatte das Gefühl, sich mehr Kalorien zugeführt zu haben.

»Iss deinen Teller leer!« – diese ständige Ermahnung der Eltern an ihre Kinder hat anscheinend fatale Folgen: Das Sättigungsgefühl richtet sich nicht mehr nach der Nahrungsmenge, sondern danach, ob alles vertilgt wurde.

Obesity Research, Bd. 13, S. 93

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Bei Tests fühlten sich die meisten Menschen erst satt, als der Teller leer war – auch wenn er durch einen Schlauch im Boden heimlich nachgefüllt wurde.

MEDIZIN

Dehnungstest auf Tumorzellen

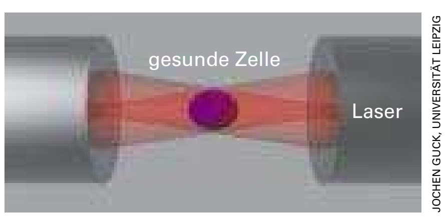
Die Elastizität einer Zelle verrät, ob sie gesund oder entartet ist. Auf dieser Erkenntnis beruht eine neuartige Krebsdiagnose, die Jochen Guck und Josef Käs vom Institut für experimentelle Physik der Universität Leipzig entwickelt haben. Die Zelle wird dabei von entgegengesetzten Seiten mit zwei Lasern bestrahlt und durch den Impuls der Lichtteilchen gestreckt. Wie stark sie sich dehnt, hängt von ihrem Gesundheitszustand ab.

Gesunde Zellen verfügen im Gegensatz zu bösartigen über ein inneres Fasergerüst, das »Zytoskelett«. Dadurch widersetzen sie sich dem »optischen Strecker« und verformen sich kaum. Zellen aus Krebsgewebe lassen sich dagegen um bis zu vierzig Prozent leichter dehnen. Besonders aggressive Tumoren, die zur Bildung von Tochtergeschwülsten neigen, geben sogar noch mehr nach. Dadurch kann man schon am Primärtumor erkennen, ob mit Metastasen zu rechnen ist.

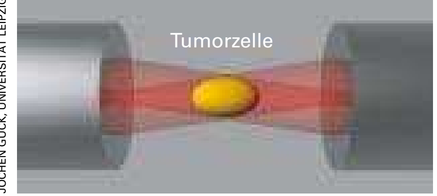
Bei Tests im Labor genügten den Leipziger Physikern für eine sichere Diagnose rund fünfzig krebsartige Zellen. Damit ist die optische »Streckbank« sehr viel empfindlicher und zuverlässiger als herkömmliche Methoden, bei denen zwischen 10 000 und 100 000 Zellen untersucht werden müssen.

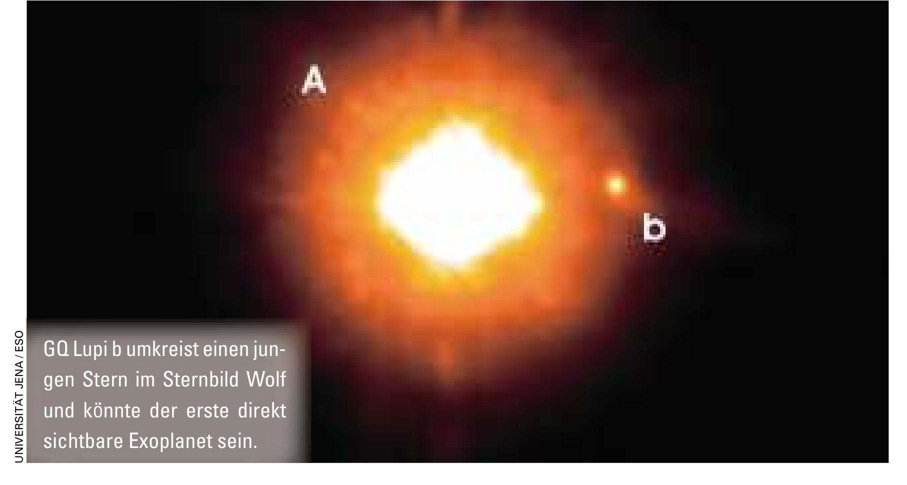
Konferenz »Physics 2005« in Warwick (England)

Der »optische Strecker« identifiziert Krebszellen anhand ihrer stärkeren Dehnbarkeit.



JOCHEN GUCK, UNIVERSITÄT LEIPZIG





UNIVERSITÄT JENA / ESO

GQ Lupi b umkreist einen jungen Stern im Sternbild Wolf und könnte der erste direkt sichtbare Exoplanet sein.

ASTRONOMIE

Schnappschuss eines Exoplaneten?

Indirekt wurden schon rund 150 Planeten außerhalb unseres Sonnensystems nachgewiesen. Doch erst letzten September präsentierten Forscher eine Infrarotaufnahme, auf der ein solches Objekt direkt zu sehen sein könnte – dicht neben einem Braunen Zwerg (SdW 11/2004, S. 9). Allerdings ließ sich nicht mit letzter Sicherheit sagen, ob es diesen tatsächlich umkreist und ob es wirklich ein Planet und nicht vielleicht auch nur ein Brauner Zwerg ist.

Jetzt glaubt ein Forscherteam um Ralph Neuhäuser von der Universität Jena mit dem Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte Eso in Chile einen Exoplaneten »fotografiert« zu haben, der einen echten Stern umkreist: den rund 400 Lichtjahre entfernten GQ Lupi. Der Radius seiner Umlaufbahn beträgt etwa die 2,5fache Distanz von Pluto zur Sonne. Im Nachhinein ließ sich das Objekt auch auf bis zu fünf Jahre alten Aufnahmen entdecken und so nachweisen, dass es tatsächlich an den Stern gebunden ist. Doch steht auch hier nicht zweifelsfrei fest, ob es ein Planet ist; denn wegen der weiten Umlaufbahn lässt sich seine Masse nicht genau berechnen. Nach Neuhäusers Abschätzungen ist er etwa doppelt so schwer wie Jupiter. Aber er könnte auch bis zu vierzigmal so viel wiegen; dann aber wäre es ein Brauner Zwerg.

(Eso-Pressemeldung vom 7.4.2005)

HIRNFORSCHUNG

Wo der Ohrwurm herkommt

Jeden Morgen das gleiche Lied: Irgendein Schlager, der aus dem Radiowecker schallt, verfolgt einen den ganzen Tag. US-Forscher sind dem Phänomen nun nachgegangen. Sie spielten Personen diverse Musikstücke vor – allerdings drehten sie zwischendrin kurz den Ton ab. Zugleich untersuchten sie die Gehirne der Probanden per Kernspintomograf. Wie vermutet, aktivierte die Musik den »auditorischen Assoziationskortex«. Und der schaltete in den Pausen keineswegs ab – weshalb die Versuchspersonen die Melodie im Stillen weiterhörten.

Generell aktivierten bekannte Schlager den auditorischen Assoziationskortex stärker als unbekannte, und nur bei ihnen lief die Platte innerlich weiter. Wurden rein instrumentale Stücke unterbrochen, blieb zusätzlich der linke primäre auditorische Kortex aktiv. Als Grund vermuten die Forscher, dass sich das Gehirn stärker anstrengen muss, die Lücke zu füllen, wenn ihm keine Wörter dabei helfen.

(Nature, 10.3.2005, S. 158)



NASA

TECHNIK

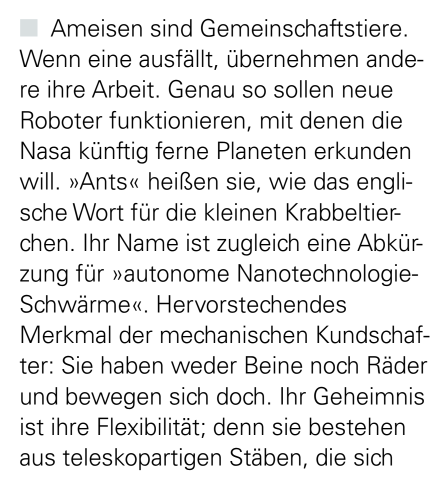
Radlose rollende Roboter

Ameisen sind Gemeinschaftstiere. Wenn eine ausfällt, übernehmen andere ihre Arbeit. Genau so sollen neue Roboter funktionieren, mit denen die Nasa künftig ferne Planeten erkunden will. »Ants« heißen sie, wie das englische Wort für die kleinen Krabbeltierchen. Ihr Name ist zugleich eine Abkürzung für »autonome Nanotechnologie-Schwärme«. Hervorstechendes Merkmal der mechanischen Kundschafter: Sie haben weder Beine noch Räder und bewegen sich doch. Ihr Geheimnis ist ihre Flexibilität; denn sie bestehen aus teleskopartigen Stäben, die sich ein- und ausfahren lassen wie bei einem Fotostativ. Dadurch können sie, obwohl sie im Grundzustand ein regelmäßiges Vieleck bilden, fast beliebige Formen annehmen und sich durch Kippen und Rollen selbst in zerklüftetem Gelände problemlos, wenn auch torkelnd fortbewegen.

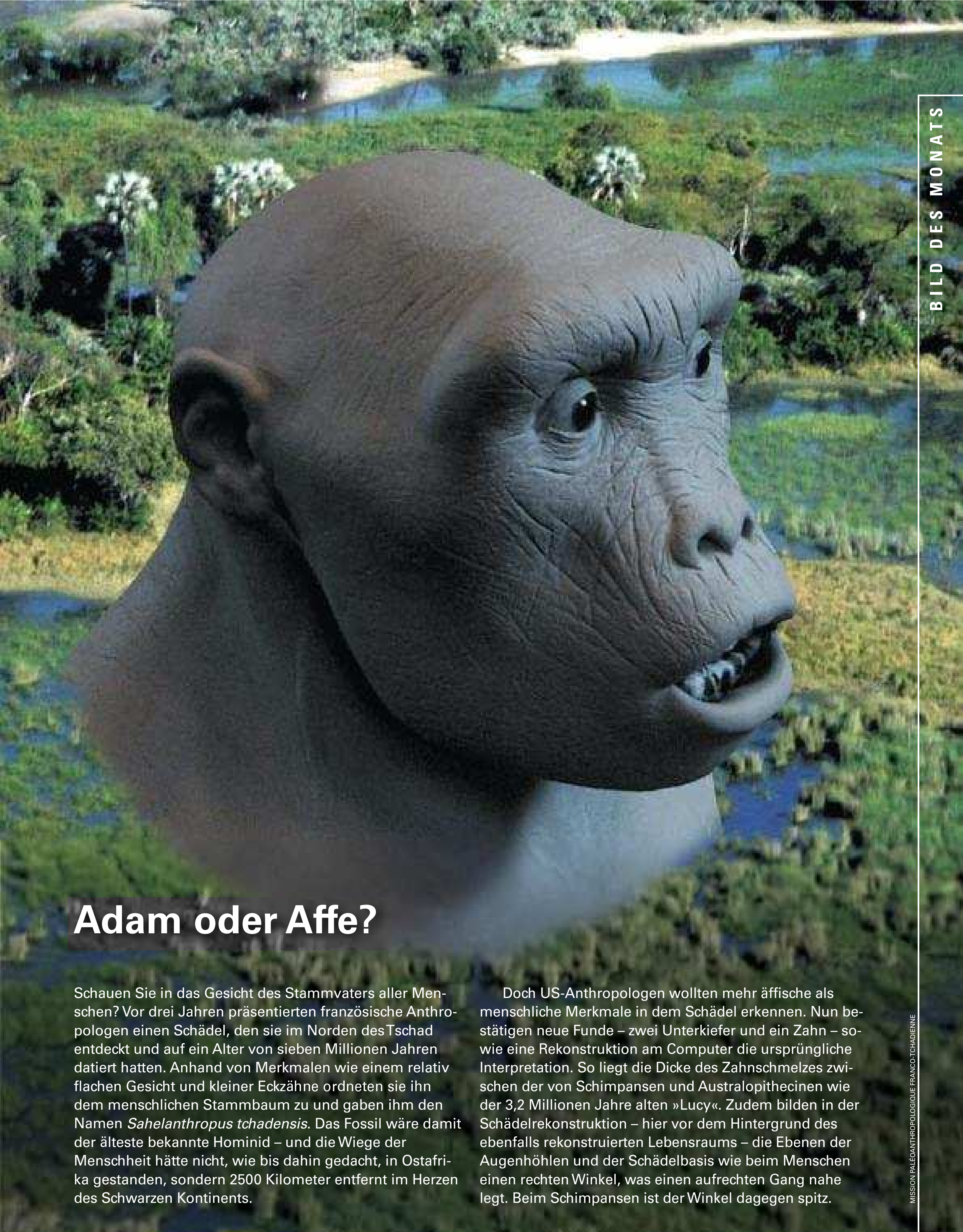
Ein weiterer Vorzug soll ihre Fähigkeit sein, sich zu größeren Strukturen zusammenzulagern – etwa Brücken oder sogar Teleskopantennen. Einem Schwarm aus Ants bieten sich so fast unbegrenzte Möglichkeiten. Wird ein Teil beschädigt, kann ein anderes einspringen. Nachdem der Prototyp in der Antarktis seine erste Bewährungsprobe bestanden hat, geht es nun darum, das noch knapp einen Meter große Gerät zu miniaturisieren und mit künstlicher Intelligenz auszustatten.

Nasa-Pressemeldung vom 29.3.2005





◀ Auch ohne Räder und Beine kann sich der tetraedrische Ant-Roboter fortbewegen: Durch Ein- und Ausfahren der Streben bringt er sich gezielt zum Umkippen und durchquert so torkelnd und rollend selbst stark unebenes Gelände.

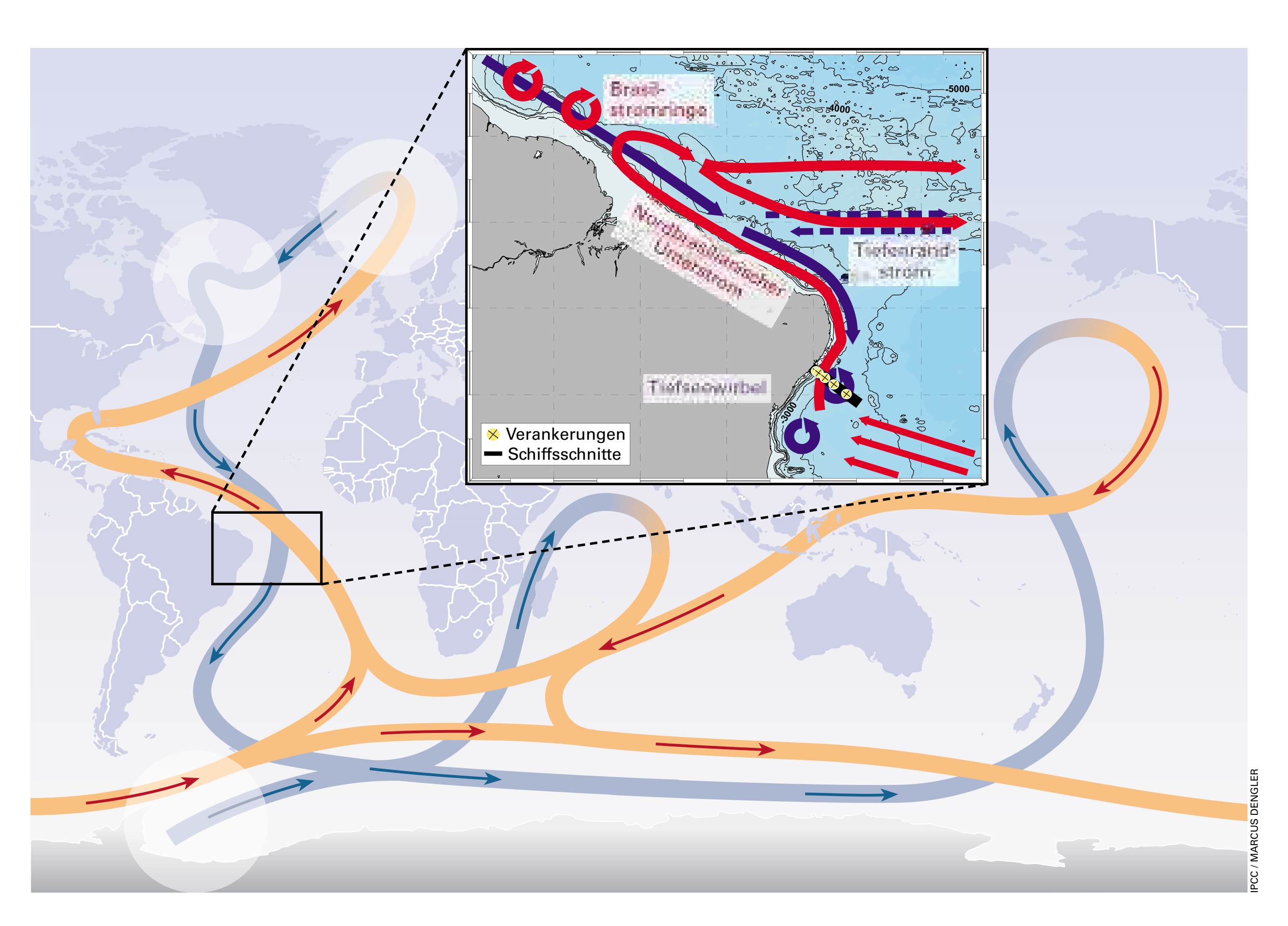


Adam oder Affe?

Schauen Sie in das Gesicht des Stammvaters aller Menschen? Vor drei Jahren präsentierten französische Anthropologen einen Schädel, den sie im Norden des Tschad entdeckt und auf ein Alter von sieben Millionen Jahren datiert hatten. Anhand von Merkmalen wie einem relativ flachen Gesicht und kleiner Eckzähne ordneten sie ihn dem menschlichen Stammbaum zu und gaben ihm den Namen *Sahelanthropus tchadensis*. Das Fossil wäre damit der älteste bekannte Hominid – und die Wiege der Menschheit hätte nicht, wie bis dahin gedacht, in Ostafrika gestanden, sondern 2500 Kilometer entfernt im Herzen des Schwarzen Kontinents.

Doch US-Anthropologen wollten mehr äffische als menschliche Merkmale in dem Schädel erkennen. Nun bestätigen neue Funde – zwei Unterkiefer und ein Zahn – sowie eine Rekonstruktion am Computer die ursprüngliche Interpretation. So liegt die Dicke des Zahnschmelzes zwischen der von Schimpansen und Australopithecinen wie der 3,2 Millionen Jahre alten »Lucy«. Zudem bilden in der Schädelrekonstruktion – hier vor dem Hintergrund des ebenfalls rekonstruierten Lebensraums – die Ebenen der Augenhöhlen und der Schädelbasis wie beim Menschen einen rechten Winkel, was einen aufrechten Gang nahe legt. Beim Schimpansen ist der Winkel dagegen spitz.

MISSION PALÉOANTHROPOLOGIQUE FRANCO-TCHADIENNE



IPCC / MARCUS DENGLER

OZEANOGRAFIE

Wirbel in der Tiefsee

Wie neue Messungen der Meeresströmungen vor der Küste Brasiliens zeigen, wandern in mehr als tausend Meter Tiefe riesige Wirbel nach Süden und führen Wassermassen polaren Ursprungs mit sich.

Von Marcus Dengler und Carsten Eden

Ringförmige Wirbel nahe der Oberfläche sind aus vielen Meeresregionen bekannt. Im westlichen tropischen Atlantik nördlich des Äquators transportieren beispielsweise die Brasilstromringe warmes Wasser nach Norden. Südlich des Kaps der guten Hoffnung bilden die Algulhasringe einen wesentlichen Bestandteil der dortigen Ozeanzirkulation. An der Ostküste von Nordamerika schließlich entstehen die Golfstromringe, die warmes Wasser nordwärts verfrachten. Nun hat unsere Arbeitsgruppe am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften in Kiel mit Messungen und Modellsimulationen erstmals gezeigt, dass solche kohärenten Wirbel auch in großen Tiefen vorkommen. Bisher hatte das niemand vermutet.

All diese Ringe und Wirbel lassen sich als Teil einer weltumspannenden Meerwasserzirkulation betrachten, die als eine Art globales Förderband die Ozeane durchzieht. Im Europäischen Nordmeer, der Labradorsee und nahe der Antarktis – in der Weddell-See und im Rossmeer – gelangen im Winter durch Konvektion kalte Wassermassen in große Tiefen. Dort strömen sie dann, abgeschirmt vom direkten Einfluss der Atmosphäre, in Richtung Äquator. Allerdings werden sie dabei sehr stark durch den Effekt der Erdrotation beeinflusst, wodurch die Strömung überwiegend am Westrand der Kontinente verläuft. Als Resultat entstehen starke westliche »Tiefenrandströme«, deren Existenz schon in den 1950er Jahren postuliert und seither in allen Ozeanen beobachtet wurde.

Auf ihrem Weg durch die Tiefsee vermischen sich die kalten Wassermassen langsam mit darüber liegenden wärmeren Schichten, was sie allmählich aufsteigen lässt. Dieser Vorgang bildet den eigentlichen Antrieb der Umwälzzirkulation – im Widerspruch zu vielen populären Darstellungen, wonach das an den Polen absinkende dichte kalte Wasser das globale ozeanische Förderband in Bewegung hält. Den Kreislauf schließt eine oberflächennahe Ausgleichströmung, die warme Wassermassen in die Bildungsgebiete von Tiefenwasser zurückführt. Auch sie bewegt sich wegen der Erdrotation überwiegend am westlichen Kontinentalrand. Allerdings werden die oberflächennahen Strömungen zusätzlich durch den Wind angetrieben, dessen Einfluss in der Regel dominiert.

Das globale ozeanische Förderband besteht also aus einer tiefen und einer oberflächennahen Strömung und wird durch die Abkühlung an den Polen und die vertikale Vermischung im Inneren (als eigentlichem Antrieb) aufrechterhalten.

Ein globales Zirkulationssystem durchzieht die Ozeane. An wenigen Stellen (helle Kreise) sinkt kaltes, dichtes Wasser ab und bildet Tiefenströme (blau). An der Oberfläche bewegen sich dafür warme Wassermassen in die entgegengesetzte Richtung (rot). Meeresbodenverankerungen vor der Küste Brasiliens mit daran aufgehängten Strömungsmessern lieferten nun Hinweise auf Wirbel in der Tiefsee (Ausschnittvergrößerung).

Es transportiert große Wärmemengen polwärts und gibt sie dort an die Atmosphäre ab. Dieser ozeanische Wärmetransport erreicht ähnliche Größenordnungen wie der durch die Luftmassen; beide tragen zu einem relativ milden Klima in hohen und mittleren Breiten bei.

In welche Richtung das kalte Tiefenwasser strömt, hängt davon ab, wo es sich bildet. Auf der Nordhalbkugel geschieht das ausschließlich im Atlantik. Deshalb gibt es nur in diesem Ozean einen Tiefenrandstrom, der im hohen Norden entspringt und über den Äquator hinweg bis weit in den Süden vorstößt. Von dort dringt er teilweise bis in den Indischen und Pazifischen Ozean vor, wo die Strömungsrichtung dann genau umgekehrt ist: Das kalte Tiefenwasser bewegt sich von Süden nach Norden.

Klimasturz in Nordeuropa?

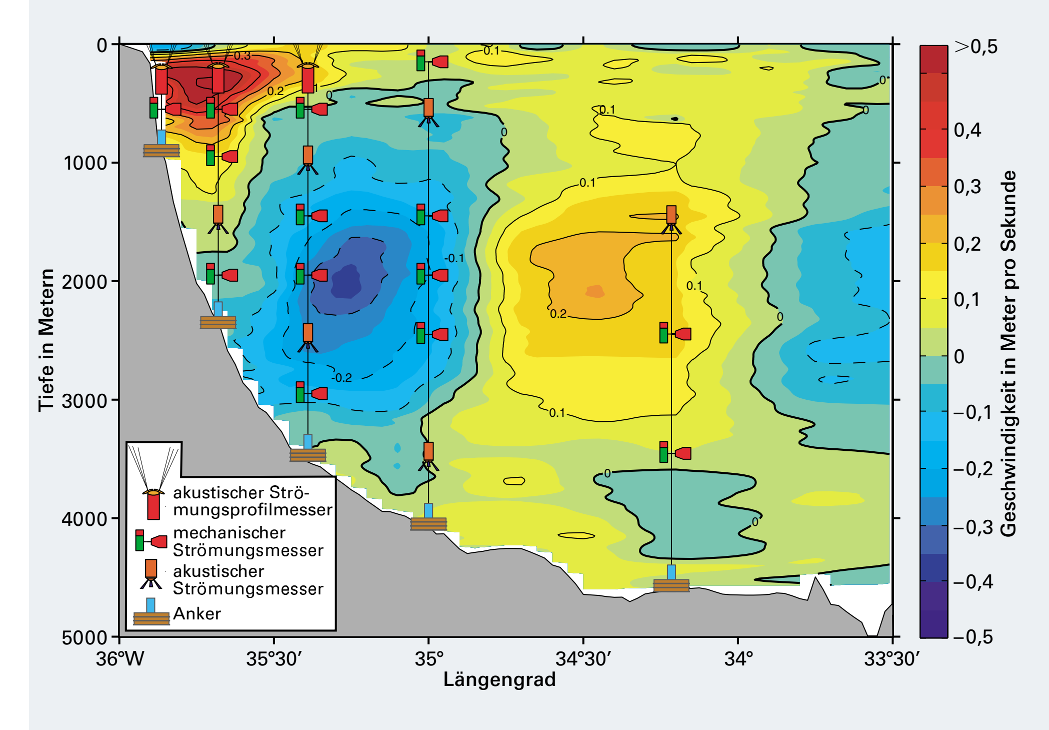
Diese Asymmetrie im ozeanischen Förderband und im zugehörigen Wärmetransport ist eine Ursache für das viel mildere Klima in Nordeuropa im Vergleich zu dem auf ähnlichen Breiten an der Westküste Nordamerikas. Durch die momentane globale Erwärmung könnte sich allerdings die Umwälzzirkulation im Atlantik abschwächen. Viele Klimamodelle sagen das für die nächsten hundert Jahre voraus, wenn der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre im erwarteten Ausmaß steigt. Die Auswirkungen wären dramatisch: In Nordeuropa könnte die Durchschnittstemperatur innerhalb weniger Jahre um mehrere Grad Celsius fallen.

Vor diesem Hintergrund erscheint es hochinteressant, das ozeanische Förderband und insbesondere seine Änderung genau zu vermessen. Wegen der Größe der Weltmeere und der starken räumlichen und zeitlichen Variabilität der Strömungen würde das aber einen enormen Aufwand erfordern. Bisherige Messkampagnen haben sich deshalb darauf beschränkt, die Umwälzzirkulation in einem begrenzten Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt – etwa während einer Schiffskampagne – zu erfassen. In anderen Fällen wurden einzelne Tiefenrandströme über längere Zeit verfolgt.

Dabei zeigten Messungen in verschiedenen Regionen des Nordatlantiks, dass der Strömungskern in einer Tiefe von 1500 bis 3000 Metern am Kontinentalabhang entlang verläuft. Die transportierten Wassermengen sind beachtlich – zwischen 10 und 40 Millionen Kubikmeter pro Sekunde. Zum Vergleich: Der Abfluss des Amazonas beträgt »nur« 0,2 Millionen Kubikmeter pro Sekunde.

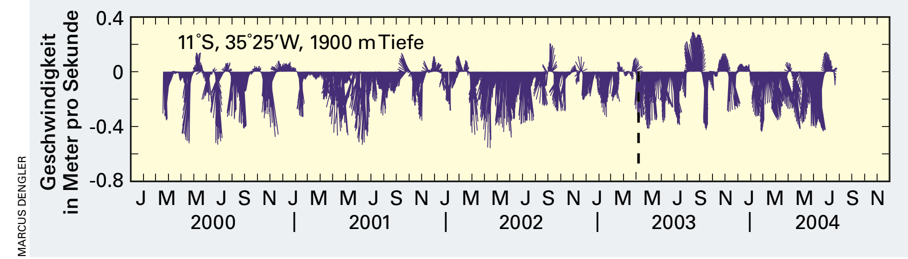
Vor der Küste Brasiliens treten gleich zwei Randströme auf, einer in der Tiefe und einer an der Oberfläche. Sie verlaufen in entgegengesetzter Richtung. Die oberflächennahe Strömung, die hier Nordbrasilianischer Unterstrom genannt wird und 300 Meter unter dem Meeres- ▷

Meeresströmungen vor Brasilien

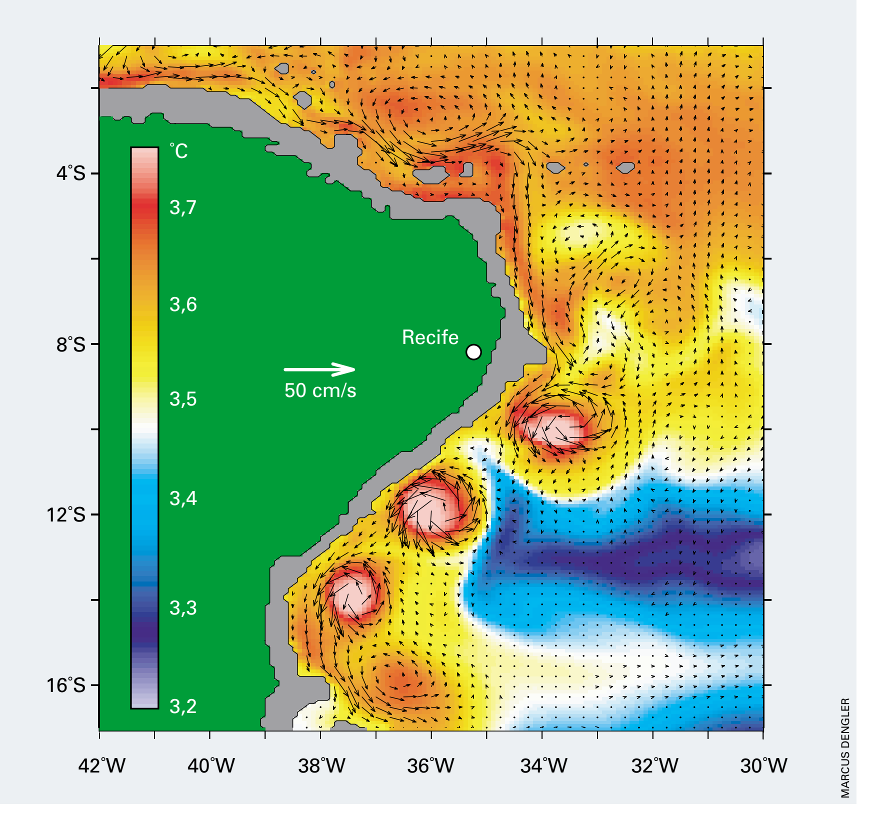


Insgesamt fünf Verankerungen mit akustischen und mechanischen Strömungsmessern in unterschiedlichen Wassertiefen wurden vor der Küste Brasiliens angebracht (oben). Die Farben veranschaulichen das während einer Reise mit der FS Sonne im Mai 2003 gemessene küstenparallele Geschwindigkeitsfeld. In Tiefen von 1000 bis 3000 Metern herrschte damals am Kontinentalabhang eine starke südwärtige und östlich davon eine nach Norden gerichtete Strömung. Beide gehören offenbar zu einem Tiefseewirbel. An der Küste oberhalb von 1000 Metern ist die oberflächennahe, nach Norden gerichtete Warmwasserströmung zu erkennen.

Wie die Zeitserie der Daten eines Strömungsmessers aus 1900 Meter Tiefe zeigt, unterliegt die Geschwindigkeit starken periodischen Fluktuationen, die vom Durchzug einzelner Tiefseewirbel herrühren (unten).



MARCUS DENGLER



Auch in einer hochauflösenden Computersimulation der Tiefenströmung vor Brasilien bildet sich südlich von Recife eine Wirbelstraße. Hier sind die berechneten Strömungen (Pfeile) und die Temperaturverteilung (Farben) in 1900 Meter Tiefe dargestellt.

spiegel ihr Maximum erreicht, transportiert mit einer Rate von 23 Millionen Kubikmetern pro Sekunde warme Wassermassen aus dem Südatlantik und dem Indischen Ozean über den Äquator nach Norden. Ein Teil davon wird dann durch die Brasilstromringe in die Karibische See befördert; von dort gelangt es mit dem Golf- und schließlich dem Nordatlantikstrom in die subpolaren und polaren Regionen des Nordatlantiks. Ein anderer Teil dreht nördlich des Äquators in Richtung Osten ab.

Im Rahmen des international koordinierten Klimaforschungsprogramms Clivar (Climate Variability) haben wir kürzlich ein fünfjähriges Messprogramm im Südatlantik durchgeführt. Wir wollten feststellen, ob und wie sich in diesem Zeitraum die Strömungen vor der Küste Brasiliens verändern. Dazu legten wir fünf Tiefseeverankerungen aus, an denen in verschiedener Tiefe akustische und mechanische Strömungsmesser sowie Salzgehalts- und Temperatursensoren befestigt waren. Die Wartung erfolgte im Rahmen alljährlicher Expeditionen der Deutschen Forschungsschiffe FS Meteor und FS Sonne. Dabei wurden über mehrere Wochen hinweg zusätzlich räumlich hoch aufgelöste Strömungsfelder ermittelt sowie die Verteilung von Temperatur und Salzgehalt gemessen.

Das Ergebnis war eine Riesenüberraschung: Statt relativ stetiger südwärtiger Geschwindigkeiten am Kontinentalabhang, die ein westlicher Tiefenrandstrom hervorrufen würde, registrierten wir 1000 bis 3000 Meter unter dem Meeresspiegel stark ausgeprägte Fluktuationen mit Perioden von sechzig bis siebzig Tagen. Außerdem zeigten die räumlich hoch aufgelösten Strömungsfelder, die wir direkt vom Schiff aufnahmen, ein frappierendes Muster. Danach bewegen sich zwar, wie erwartet, direkt an der Küste große Mengen Wasser nach Süden, gleichzeitig aber fließen etwas weiter im Inneren des Ozeans vergleichbare Wassermassen nach Norden.

Frischwasser aus dem Nordatlantik

Die Daten über die Temperatur sowie den Salz- und Sauerstoffgehalt zeigten, dass beide Ströme – der südwärtige am Küstenrand und der gleich starke nordwärtige weiter draußen – frisch gebildetes Tiefenwasser aus dem Nordatlantik enthalten. Für diese Beobachtungen gibt es nur eine Erklärung: Der Tiefenrandstrom zerfällt am Ostrand Brasiliens offenbar in eine Serie von Wirbeln, die am Kontinentalabhang entlang nach Süden ziehen. Sie brauchen jeweils sechzig bis siebzig Tage, um unsere Verankerungen zu passieren.

Um diese Interpretation zu erhärten, griffen wir auf Computersimulationen zurück. Dazu installierten wir auf den neuen Supercomputern des Deutschen Klima-Rechenzentrums in Hamburg ein hochauflösendes numerisches Strömungsmodell. Es lieferte ein Bild, das sich erstaunlich gut mit unseren Beobachtungen deckte. So entwickelte sich auch auf dem Rechner südlich des Breitengrads von Recife eine Wirbelstraße im Tiefenrandstrom. Während er nördlich dieser Stelle kontinuierlich der Küste folgte, bildete er südlich davon kohärente Ringe, die langsam südwärts zogen und dabei 18 Millionen Kubikmeter Wasser pro Sekunde beförderten.

Warum löst sich der bis dahin ruhig dahinfließende Tiefenrandstrom bei Recife plötzlich von der Küste ab und verwirbelt? Eine definitive Antwort lässt sich zwar noch nicht geben, aber eine plausible Vermutung liegt nahe. Demnach verleiht die meridionale (nordsüdliche) Änderung in der Stärke der Erdrotation meridionalen Tiefseeströmungen prinzipiell die Tendenz, Wirbel zu bilden. Normalerweise wirkt die Reibung mit dem Kontinentalrand dieser Tendenz entgegen. Hinter dem vorspringenden Sporn von Recife aber weicht die Küste plötzlich zurück, sodass sich der Reibungswiderstand verringert. Dadurch kann sich der natürliche Hang zur Wirbelbildung möglicherweise durchsetzen.

Allerdings zeigte das Modell auch eine Besonderheit, für die es in der Realität bisher noch keine Anhaltspunkte gibt. Demnach verstärkt sich zwischen April und September der Tiefenrandstrom nördlich von Recife. Parallel dazu steigt die Anzahl und Intensität der Wirbel südlich dieses Punkts. Der Zusammenhang zwischen den beiden Ergebnissen scheint uns bemerkenswert. Wir schließen daraus, dass vermutlich auch im echten Ozean eine Korrelation zwischen Randstromstärke und Anzahl sowie Intensität der Wirbel besteht. Wenn sich das globale Förderband, wie von mehreren Klimamodellen vorhergesagt, tatsächlich verlangsamt, sollten sich die Wirbel vor Brasilien also stark abschwächen oder ganz verschwinden. Während unseres fünfjährigen Messprogramms konnten wir allerdings noch keine Abnahme des südwärtigen Transports von Tiefenwasser erkennen.

Marcus Dengler und **Carsten Eden** sind promovierte Ozeanografen am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften in Kiel.

Meister der Strömungsmechanik

Das mathematische Gegenstück zum Nobelpreis geht dieses Jahr an einen Vertreter der angewandten Mathematik. Peter D. Lax hat die Lösung physikalisch relevanter Gleichungen mit dem Computer und mit theoretischen Mitteln entscheidend vorangebracht.

Von Christoph Pöppe

Ein eher unscheinbarer Mann mit stark gelocktem, grauem Haarschopf tritt ohne ein Stück Papier an die Tafel, dankt schüchtern lächelnd für die Einladung zum Vortrag und stellt ein mathematisches Problem vor. Dann kratzt er sich gedankenvoll an der Nase und lässt sein Publikum an den Ideen teilhaben, die ihm soeben zur Lösung des Problems einzufallen scheinen. Es ist nicht schwer, ihm zu folgen, während er, immer noch herumprobierend, eine Gleichung nach der anderen anschreibt. Eine Stunde später hat er seinen Zuhörern unauffällig das Gefühl vermittelt, es ergebe sich doch eins ganz natürlich aus dem anderen. Nur ist auf die bahnbrechende Theorie, die er da präsentiert hat, außer ihm niemand gekommen. Peter D. Lax ist so genial, dass man gar nicht merkt, wie schwer Mathematik eigentlich ist.

Deshalb verwundert es auch kaum, dass er nun den Abelpreis erhalten hat. Diese Auszeichnung soll für die Mathematik dasselbe sein wie der Nobelpreis für die Naturwissenschaften: skandinavischen Ursprungs, hoch dotiert und Krönung eines Lebenswerks – im Gegensatz zur Fields-Medaille, die ausdrücklich jungen Mathematikern vorbehalten ist. Da der Abelpreis in diesem Frühjahr erst zum dritten Mal vergeben wurde, herrscht noch lange kein Mangel an erstrangigen Kandidaten.



NEW YORK UNIVERSITY

Karriere am Emigranten-Institut

Als die Nationalsozialisten in Deutschland die jüdischen Hochschullehrer aus dem Amt jagten und damit Göttingen, das damalige Weltzentrum der Mathematik, auf provinzielles Niveau zurückwarfen, war Lax gerade einmal sieben Jahre alt. Acht Jahre später kamen Hitlers Handlanger mit dem Krieg auch in seine Heimatstadt Budapest, sodass seine jüdische Familie in die USA emigrieren musste. Dort studierte der junge Einwanderer Mathematik und promovierte – nach kurzem Intermezzo beim Manhattan-Projekt zum Bau der ersten Atombombe – bei einem der prominentesten Göttingen-Flüchtlinge: Richard Courant. Der hatte an der Universität New York das nach ihm benannte Institut für Mathematik gegründet und unter maßgeblicher Beteiligung zahlreicher Emigranten aus Europa zu einer der weltweit bedeutendsten mathematischen Forschungsstätten gemacht. Lax avancierte rasch zu einer der führenden Persönlichkeiten dieses Instituts und blieb ihm bis zu seiner Emeritierung treu. ▷

◀ In Budapest geboren und vor den Nationalsozialisten geflohen, machte der diesjährige Abelpreisträger Peter D. Lax am New Yorker Courant-Institut für Mathematik eine steile Karriere.


LUNAR AND PLANETARY INSTITUTE

Solitonwellen – hier im Mittelmeer östlich der Straße von Gibraltar – wandern umso schneller, je höher sie sind, und zerfließen nicht mit der Zeit. Mathematisch beschrieben werden sie durch die Korteweg-de-Vries-Gleichung, für deren Lösung Lax die entscheidende Idee lieferte.

In seine frühen Jahre fiel der Aufstieg der Computer. Die Forscher des Courant-Instituts nutzten die neuartigen Geräte alsbald für die Simulation von Strömungsprozessen, was gerade für die Numerik eine besonders schwierige Aufgabe ist. Denn nicht nur bei Explosionen, sondern schon bei der Verdrängung der Luft durch ein gewöhnliches Flugzeug entstehen Stoßwellen: bewegliche Grenzflächen, an denen sich der physikalische Zustand des Mediums – Dichte, Bewegungsgeschwindigkeit, Temperatur – jäh (»unstetig«) ändert. Dagegen beruhen klassische Rechenverfahren auf der Annahme, dass alle entscheidenden Größen nur allmählich (»stetig«) variieren.

Lax entwickelte in Zusammenarbeit mit Fachkollegen Rechenschemata, die mit derlei Unstetigkeiten korrekt umgehen können. Heute stehen sie unter den Namen Lax-Wendroff und Lax-Friedrichs in den Lehrbüchern. Damit wäre der diesjährige Abelpreisträger bei der üblichen Einteilung des Fachs in »reine« und »angewandte« Mathematik eindeutig in die letztere Schublade einzusortieren.

Lax selbst hat sich über derlei Einteilungen stets hinweggesetzt, was von seiner Arbeit her gesehen nur konsequent war. Vor jedem numerischen Schema kommt die Theorie der zu lösenden Gleichung, und die bedurfte insbesondere im Falle der Stoßwellen dringend der Nachbesserung. Wie praktisch alle Gleichungen der Physik, die eine Bewegung beschreiben, sind auch diejenigen der Strömungsmechanik so genannte Differenzialgleichungen: Sie setzen Ableitungen – räumliche oder zeitliche Änderungsraten – einer gesuchten Größe miteinander und mit der Größe selbst in Beziehung. Wo aber die Größe unstetig ist, hat sie auch keine Ableitungen mehr.

Damit hört die Beschreibung der Natur durch die Differenzialgleichung auf zu existieren, aber nicht die Natur selbst – natürlich nicht. Also muss man die Differenzialgleichung so verallgemeinern, dass sie Unstetigkeiten mit umfasst. Das gelingt auch, allerdings um den Preis, dass die Eindeutigkeit der Lösung verloren geht: Auf einmal gibt es sehr viele Funktionen, welche die Gleichung in dem erweiterten Sinne erfüllen. Die Natur, von solchen Mehrdeutigkeiten unbeeinträchtigt, wählt aus dem großen Sortiment eine Lösung aus – aber welche?

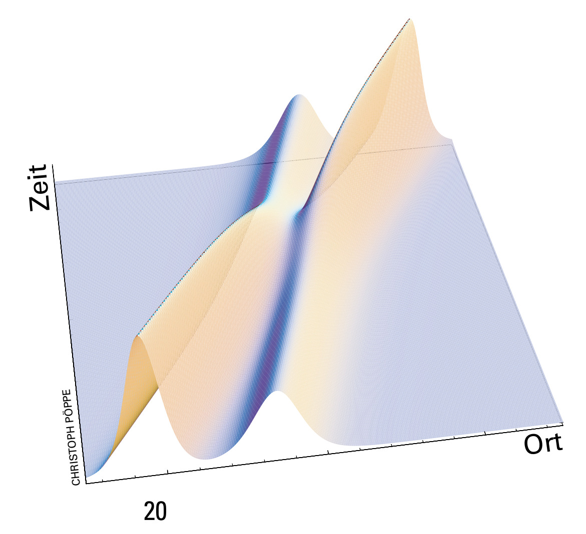
Es gelang Lax, nach Vorarbeiten durch zahlreiche andere Forscher, diese Frage abschließend zu klären. Das aus der Thermodynamik stammende Konzept der Entropie – ein Maß für die »Unordnung« eines Systems – hebt die Mehrdeutigkeit auf. Die physikalische Lösung ist diejenige, bei der die Entropie des Gesamtsystems maximal wird.

Einsame Wellen

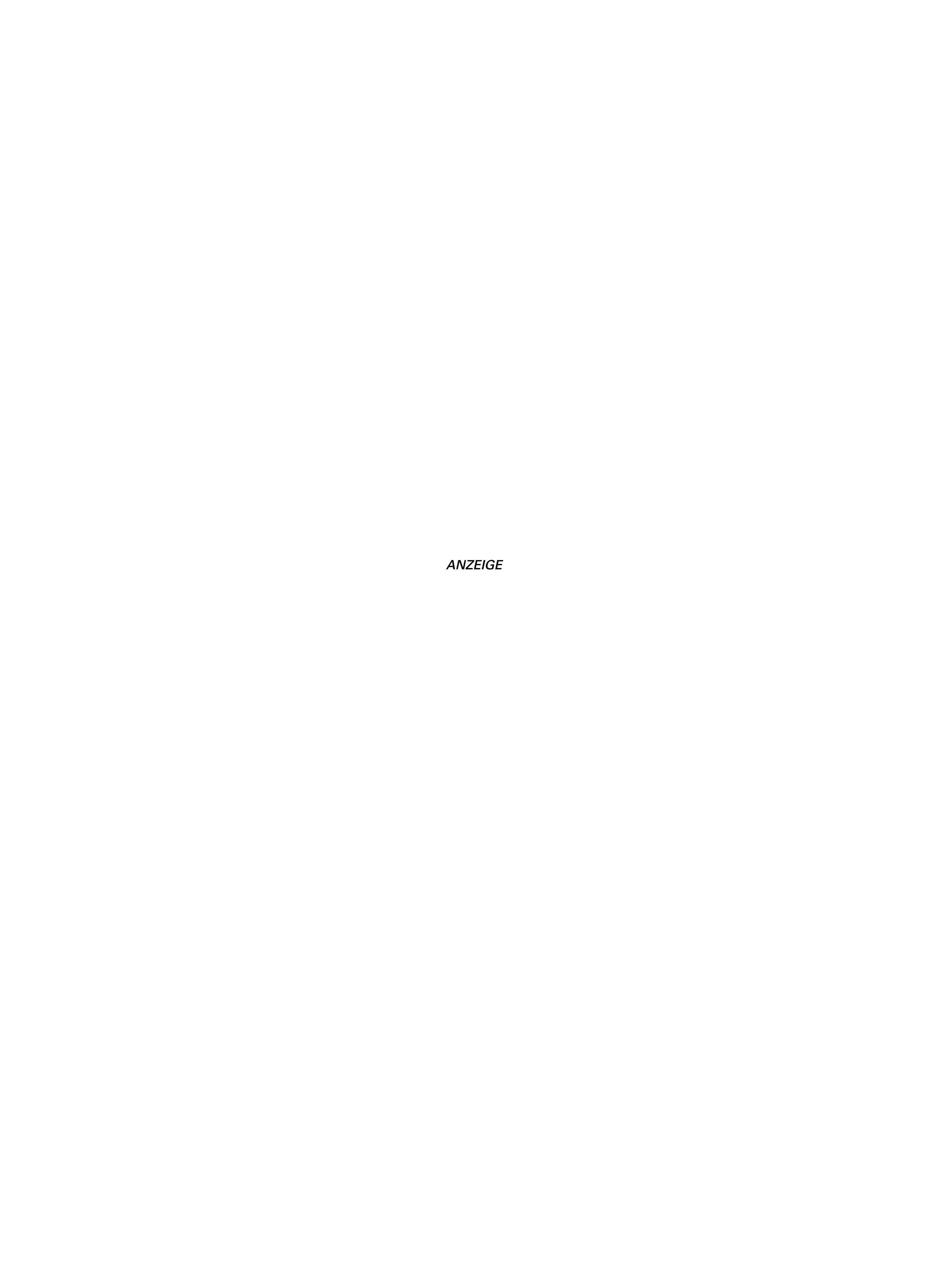
Ein weiteres bedeutendes Resultat von Lax hat der Strömungsmechanik neue Dimensionen eröffnet. Es ist zugleich ein Musterbeispiel für die Kunst, sehr Kompliziertes hinter einer geschickt gewählten Bezeichnung zu verbergen – wodurch das Problem einer Behandlung erst zugänglich wird. In diesem Fall versteckte Lax gewisse Eigenschaften einer speziellen Differenzialgleichung hinter linearen Abbildungen (»Operatoren«) in einem unendlichdimensionalen Funktionenraum. Diese lassen sich nacheinander anwenden, was formal gewisse Ähnlichkeiten mit einer (nicht kommutativen) Multiplikation hat. So kann man die komplizierten Eigenschaften der Gleichung vorübergehend vergessen und sich auf das algebraische Problem konzentrieren, das an der Multiplikation der Operatoren hängt.

Untersuchungsobjekt von Lax war die Korteweg-de-Vries-Gleichung, mit der schon im 19. Jahrhundert so genannte Flachwasserwellen berechnet wurden, die bei der Flutkatastrophe im vergangenen Dezember traurige Berühmtheit erlangten. Sie sind dadurch charakterisiert, dass ihre Wellenlänge weit größer als die Wassertiefe ist. Als spezielle Lösungen der Korteweg-de-Vries-Gleichung ergeben sich so genannte Solitonen: wellenartige Erhebungen, die umso schneller wandern, je höher sie

Die Kollision zweier Solitonen lässt sich durch eine algebraische Formel darstellen. Die Wellen scheinen voneinander abzuprallen, wobei jede den Impuls der anderen übernimmt.



CHRISTOPH PÖPPE


ANZEIGE

▷ sind, und aus Kollisionen mit ihresgleichen unverändert hervorgehen.

Scheinbar aus heiterem Himmel definierte Lax zwei lineare Operatoren im Funktionenraum und formulierte damit eine Differenzialgleichung, welche der Korteweg-de-Vries-Gleichung äquivalent, aber formal viel einfacher ist. Das Operatorenpaar wurde zum Angelpunkt eines ganzen Lehrgebäudes: der Theorie der unendlichdimensionalen vollständig integrablen Systeme. Meist spricht man allerdings schlicht von Solitontheorie. Außer Flachwasserwellen erfasst sie zahlreiche Systeme mit physikalischer Bedeutung, bei denen der Trick mit dem Lax-Paar funktioniert.

Während über nichtlineare Differenzialgleichungen im Allgemeinen kaum brauchbare Aussagen existieren, gibt es für Solitongleichungen eine Fülle von Ergebnissen – formelmäßig angebbare Lösungen, die aus mehreren Solitonen bestehen. An der Ausarbeitung dieses Gebiets, das einen kometenhaften Aufschwung erlebte, hat sich sein Begründer allerdings nur noch am Rand beteiligt.

In seiner Jugend von der Weltpolitik gebeutelt, ist Lax nie der verbohrte Studierstubengelehrte geworden, der dem populären Bild vom Mathematiker entspräche. Einmal kam ihm die große Politik noch buchstäblich ins Haus. Als 1970 amerikanische Truppen im Rahmen des Vietnamkriegs in Kambodscha einmarschierten, nahm Lax selbst an einem der zahlreichen Protestzüge dagegen teil. Tags darauf legten Anarchisten, ebenfalls zu Protestzwecken, eine Bombe im Computerraum des Courant-Instituts und machten sich aus dem Staub.

Wäre der Sprengsatz explodiert, hätte er nicht nur den Computer zerstört, sondern auch die großen Glaszwischenwände bersten lassen und so weitere schwere Schäden angerichtet. Es war Lax, der gemeinsam mit einigen Kollegen beherzt die noch brennende Lunte austrat.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

ARCHÄOLOGIE

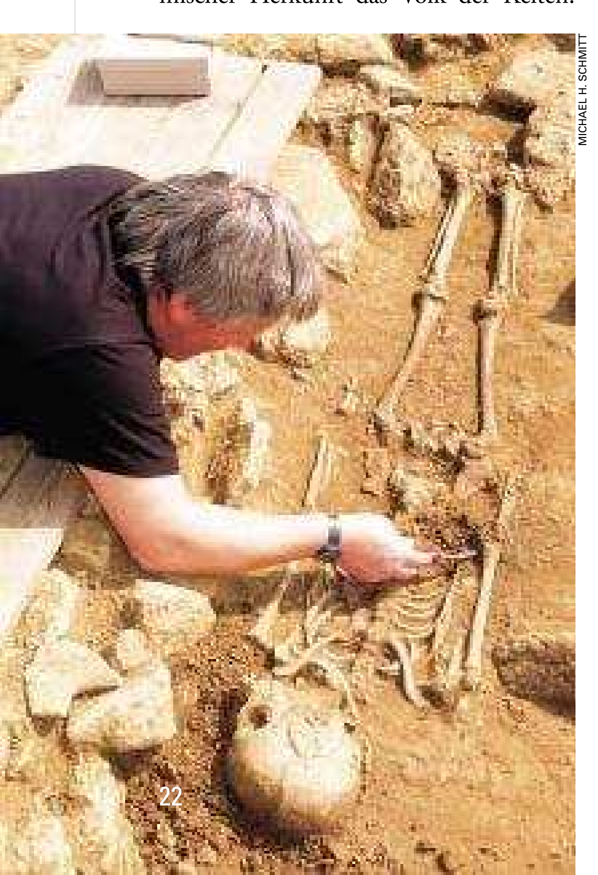
Kelten im Doppelgrab

Im Umkreis eines keltischen Fürstensitzes im saarländischen Reinheim stießen Archäologen auf die Grabstätte zweier Jugendlicher mit wertvollen Beigaben – darunter eine einzigartige Fibel.

Von Michael H. Schmitt

Leicht erregbar, trinkfest, kriegsbesessen, kurzum: Barbaren. Auf diese nicht sehr schmeichelhafte Art schildern antike Schriftsteller griechischer oder römischer Herkunft das Volk der Kelten. Leider sind ihre Berichte die einzigen überlieferten Schriftquellen, denn die Kelten selbst kannten diese Form der Dokumentation nicht. So ist es denn Aufgabe von Archäologen, den zwangsläufig subjektiven Berichten der Zeitgenossen materielle Funde gegenüberzustellen und so der in Mitteleuropa einst dominierenden Kultur eine Stimme zu geben.

Besonders aufschlussreich sind dabei Grabfunde. Offenbar glaubten die Kelten an ein Leben nach dem Tod und statteten ihre Angehörigen für die letzte Reise entsprechend aus. Mitte April dieses Jahres stießen Mitarbeiter des saarländischen Landesdenkmalamts bei Sondierungsarbeiten für eine Kläranlage nahe Reinheim auf ein keltisches Doppelgrab. Darin lagen die fast vollständig erhaltenen Skelette eines Jungen und eines Mädchens, beide 12 bis 13 Jahre alt und vor rund 2400 Jahren vermutlich kurz hintereinander gestorben. Dies ist im Saarland der erste Fund einer – generell sehr seltenen – Doppelbestattung aus dieser Zeit.



MICHAEL H. SCHMITT

◀ **Mitte April 2005 stieß der saarländische Landesarchäologe Walter Reinhard bei Sondierungsarbeiten für eine Kläranlage in Reinheim auf ein keltisches Doppelgrab. Das Foto zeigt die Freilegung des Skeletts eines etwa 12 bis 13 Jahre alten Jungen. Männliche Kelten der Führungsschicht trugen, wie zu sehen, nur einen Armring aus Bronze.**

Reinheim ist auf der Landkarte der Archäologen alles andere als ein weißer Fleck. Das Dorf liegt an der alten Salzstraße, die einst von Lothringen zum Mittelrhein und weiter führte. Salz war vor 2500 Jahren ein begehrtes Gewürz und Konservierungsmittel, das teuer gehandelt wurde. Schon 1952 stieß ein Reinheimer Baustoffhändler beim Kiesabbau an der Blies auf ein Skelett, bald darauf fand er einen bronzenen Halsreif und Keramikscherben.

Angehörige der Fürstin von Reinheim?

Zwei Jahre später entdeckten Archäologen das Grab einer Frau, das auf Grund seiner reichen Ausstattung weit über die Grenzen der Bundesrepublik hinaus bekannt wurde. Die Tote trug einen verdrillten Halsring, einen schweren Armreif und Fingerringe – alle aus Gold – sowie Armreife aus Glas und Ölschiefer, die von einer herausragenden Stellung und Herkunft zeugten. Offenbar handelte es sich, wie die religiöse Symbolik einzelner Objekte erkennen ließ, um eine Fürstin, die neben ihrer Zugehörigkeit zur politischen Führungsschicht mit weltlicher Macht auch als Priesterin kultische Funktionen ausübte.

Prunkstück des Grabensembles war eine über einen halben Meter hohe Röhrenkanne aus goldglänzender Bronze – ihrer Gestaltung und der eingravierten

Ornamentik nach ein Meisterwerk keltischer Handwerksarbeit.

Tatsächlich entpuppte sich die Bliesaue bei Reinheim im Zuge weiterer Grabungen als bedeutende keltische Siedlung mit einem Fürstensitz auf der Hommerich genannten Erhebung. Um das reiche kulturgeschichtliche Erbe der Region zu bewahren, gründeten der Saar-Pfalz-Kreis und das Département Moselle 1987 grenzüberschreitend den »Europäischen Kulturpark Bliesbruck-Reinheim«. Außer dem früh-La-Tène-zeitlichen Fürstinnengrab umfasst er weitere bedeutende archäologische Funde: einen spätbronzezeitlichen Hort und einen 16 Hektar großen römischen Vicus (Landgut) mit der zugehörigen Villa.

Die Jugendlichen des jüngsten Fundes gehörten sicherlich auch zur Oberschicht. Dafür spricht, dass sich das Grab genau nördlich der 1700 Meter entfernten Grablege der Fürstin befindet und mit seiner Längsachse darauf ausgerichtet ist. Ein weiteres Indiz sind die wertvollen Beigaben. Das Mädchen trug bei der Bestattung Arm- und Fußringe aus Bronze, der Junge den bei männlichen Kelten der damaligen Führungsschicht üblichen Armreif. Zudem fanden die Archäologen Perlen aus Glas und Bernstein und die für Kelten typischen Torques. Deren lateinischer Name bezeichnet einen mehr oder weniger steifen, offenen Halsreif mit verdickten platten Puffer-Enden, der meist aus Bronze oder Gold bestand und oftmals kunstvoll verziert war. Nur reiche Angehörige der Oberschicht konnten sich solch ein Geschmeide leisten.

Eine weitere Sensation im Doppelgrab war eine Fibel, deren Kopf dem ▷



MICHAEL H. SCHMITT



▶ **Das keltische Mädchen war bei seiner Grablegung unter anderem mit einem Armreif und zwei Halsringen (Torques) geschmückt (rechts). Von seinem Gewand ist nur noch die Fibel übrig, die es zusammenhielt. Ihr kunstvoll gestalteter Kopf (Pfeil), vermutlich einem mythologischen Wesen nachempfunden, macht sie einzigartig. Das Mädchen trug auch zwei Fußringe aus Bronze (oben). Die Knochensubstanz beider Skelette ist sehr gut erhalten. Eine DNA-Analyse soll den Verwandtschaftsgrad der Kinder untereinander klären.**

eines Pferdchens (Foto S. 25 unten) gleicht. Kelten nutzten einfache Nadeln oder Spangen aus Draht, um ihre Kleidung etwa im Schulterbereich zusammenzuhalten. Das entdeckte Exemplar zeichnet sich durch seine kunstvolle Gestaltung aus. Landesarchäologe Reinhard hält es für einzigartig und glaubt, dass der Kopf einem mythologischen Wesen nachempfunden ist. Allem Anschein nach wurde der keltische Künstler von Motiven aus dem Mittelmeerraum inspiriert.

Einst besiedelten die Kelten ein Gebiet von den Pyrenäen bis nach Irland, vom Rhein bis ans Schwarze Meer. Doch dem militärisch straff organisierten Römerreich konnte dieses in rivalisierende Stämme gegliederte Volk auf Dauer nicht standhalten. In Feldzügen besiegt und von den Annehmlichkeiten der mediterranen Kultur verführt, verloren die Kelten ihre kulturelle Eigenständigkeit.

Im heutigen Saarland befand sich offenbar eines der Kerngebiete; denn dort liegen 22 »Fürstengräber«, ein Fünftel der bisher bekannten frühkeltischen Adelsgräber. Die Archäologen haben das weitere Umfeld um das neue Doppelgrab freigelegt und werden es in den kommenden Wochen genauer untersuchen. Ihre Hoffnung: dass die Jugendlichen, wie damals üblich, in der Nähe ihrer Eltern beigesetzt wurden.

Michael H. Schmitt ist freier Journalist und Fotograf mit speziellem Interesse an der Archäologie.

PAARUNGSVERHALTEN

Mit den Waffen der Frauen

Wer zu spät kommt, den bestraft das Leben. Um diesem Schicksal zu entgehen, verleiten noch verpuppte Wespenmännchen ihre schon geschlüpften Nebenbuhler zu vergeblicher Liebesmüh.

Von Frank Schubert

Die Männchen vieler Insektenarten haben es schwer; denn die Weibchen paaren sich nur einmal im Leben – danach verlieren sie das Interesse am starken Geschlecht und suchen bloß noch einen geeigneten Platz zur Eiablage. Die Herren müssen sich daher einiges einfallen lassen, um ihre Chancen auf Nachkommen zu vergrößern. Das heißt: Sobald eine Dame zu erkennen gibt, dass sie Besuch empfangen möchte, sollte nach Möglichkeit nicht der Nebenbuhler zum Zug kommen.

Bei den Männchen der Lagererzwespe *Lariophagus distiguendus* stellt sich dieses Problem in besonderer Weise. Manche von ihnen kommen von vornherein zu spät. Das hängt mit der Lebensweise dieser Insekten zusammen: Sie legen ihre Eier an Kornkäferlarven, die sich im Inneren von Getreidekörnern entwickeln. Die aus den Eiern schlüpfenden Wespenlarven dringen in die Kornkäferlarven ein, fressen sie und entwickeln sich dann zur Puppe weiter. Aus der schlüpft etwa zweieinhalb Wochen später ein ausgewachsenes Tier, das sein Getreidekorn alsbald verlässt – und zwar die Männchen früher als die Weibchen.

Kaum haben die Herren der Schöpfung das Tageslicht erblickt, machen sie sich auf die Suche nach paarungswilligen Damen – die allerdings noch gar nicht geschlüpft sind. Die Männchen bekümmert dies nicht; sie suchen jene Getreidekörner auf, die den Sexualduftstoff der Weibchen verströmen, setzen sich darauf und warten. Wenn dann irgendwann ein weibliches Tier herauskommt, begattet es der geduldige Galan augenblicklich und kann so sichergehen, bei der Paarung der Erste zu sein.

Nun schlüpfen die Wespenmännchen aber nicht alle gleichzeitig. Manche brauchen für ihre Entwicklung etwas länger und verlassen ihr Getreidekorn später als andere. Sie sind eindeutig im Nachteil; denn während sie noch heranwachsen, knüpfen andere Männchen bereits die ersten intimen Kontakte. Sie müssen also aufpassen, dass sie nicht leer ausgehen.

Der Trick der zu spät Gekommenen

Und so greifen die Nachzügler zu einer raffinierten Hinterlist, wie der Verhaltensbiologe Joachim Ruther und seine Kollegen an der Freien Universität Berlin nun herausfanden. Die männlichen Puppen produzieren einfach denselben Sexualduftstoff wie die Weibchen – und täuschen so vor, ein Fräulein zu sein. Dadurch können paarungswillige Männchen nicht vorhersehen, ob aus einem betörend duftenden Getreidekorn wirklich eine Eva schlüpfen wird oder ein Geschlechtsgenosse.

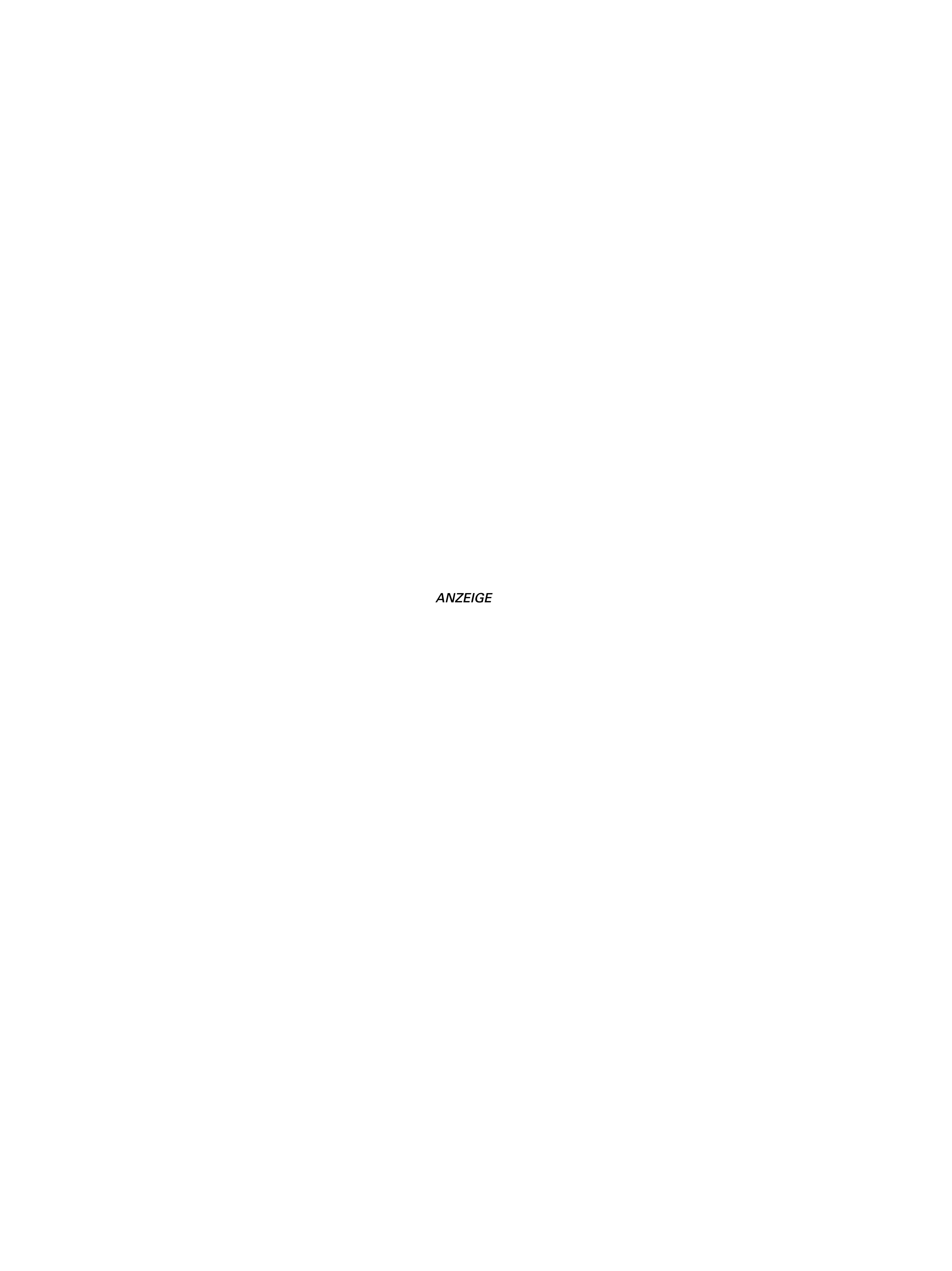
Viele Freier steuern somit irrtümlich Körner an, in denen ein Männchen heranwächst, und warten dort vergeblich ▷

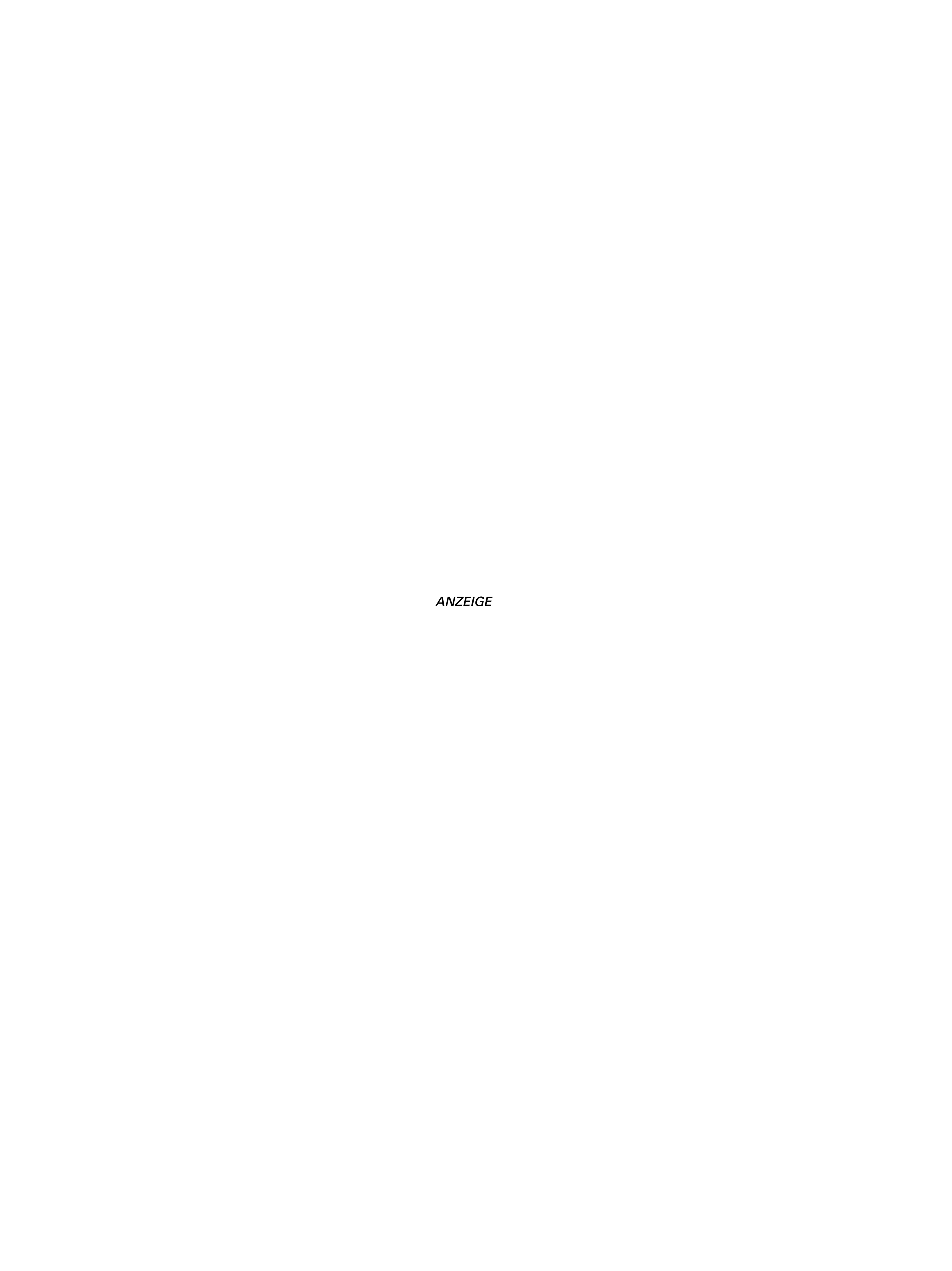




JOACHIM RUTHER

◀ Ein Weibchen der Lagererzwespe (links) und ein Männchen, das auf einem Getreidekorn sitzt und auf das schlüpfende Tier wartet, um es sofort zu begatten (rechts)


ANZEIGE


ANZEIGE

▷ auf ein erotisches Rendezvous. Währenddessen entgehen ihnen natürlich andere begattungswillige Weibchen. So erhöht sich die Chance für die Nachzügler, doch noch eine Partnerin abzubekommen.

»Ein solches Phänomen ist bisher noch nie beobachtet worden«, erklärt Ruther. Zwar würden auch bei anderen Insektenarten Männchen manchmal weibliche Lockstoffe nachahmen und so ihre Geschlechtsgenossen in die Irre führen. Aber bislang sei kein weiteres Beispiel bekannt, wo sie das schon vor dem Schlüpfen tun.

Freilich hat eine solche Kostümierung auch ihre Nachteile. So beobachteten die Berliner Forscher, dass es die Wespenmännchen nach dem Schlüpfen eilig haben, den noch anhaftenden weiblichen Sexuallockstoff loszuwerden – was ihnen durch aktiven Abbau innerhalb von 24 Stunden gelingt. »Wahrscheinlich tun sie das, um nicht von irregeführten Geschlechtsgenossen belästigt zu werden«, meint Ruther, »dies könnte sie nämlich bei ihrer Suche nach Partnerinnen stören.«

Wehrlos gegen Täuschungsmanöver

Bleibt zu klären, warum sich der Geschlechter-Bluff bei den Lagererzwespen dauerhaft durchgesetzt hat. Schließlich sollte sich ein Trick, den alle heranwachsenden Männchen anwenden, nach kurzer Zeit abnutzen. Warum haben die früh geschlüpften Freier keine Methode entwickelt, vorgetäuschte von echten weiblichen Puppen zu unterscheiden?

»Vermutlich ist der evolutionäre Druck, diesem Täuschungsmanöver auf die Schliche zu kommen, nicht sehr groß; denn es bringt für keinen der Beteiligten große Nachteile mit sich«, erläutert Ruther. Bei den Lagererzwespen kommen auf ein männliches Tier zwei weibliche – die Herren haben also reichlich Auswahl. Selbst wenn sie von Nebenbuhlern gelegentlich gefoppt werden, bleibt ihnen immer noch genügend Gelegenheit, für Nachkommen zu sorgen. »Die frühen Männchen stört es nicht sonderlich, wenn sie ihren verspäteten Geschlechtsgenossen manchmal auf den Leim gehen – sie sind ihnen gegenüber immer noch im Vorteil«, so Ruther. Für die Nachzügler lohnt sich der Betrug jedoch: Sie haben viel zu gewinnen.

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Springers EINWÜRFE von Michael Springer



Tierisches Vergnügen

Spiel und Spaß sind kein Privileg des Menschen.

Das Leben ist, rein biologisch betrachtet, eine todernste Angelegenheit. Es geht, wie wir seit Darwin wissen, um das *survival of the fittest*, ums nackte Überleben der Bestangepassten. »Keine Fisimatenten!« müsste die Parole von Zuchtmutter Natur lauten, wenn sie denn sprechen könnte. Aber das können nur wir.

Außer reden gibt es noch manches, was vermeintlich kein anderes Tier vermag: lachen und weinen, spielen und unernste Betrachtungen anstellen wie die vorliegende. So erklärte der Philosoph Helmuth Plessner anno 1941, eigentlich sei nur der Mensch fähig, etwas zum Lachen komisch zu finden (oder zum Weinen traurig); denn vor jedem anderen Tier zeichne er sich durch »exzentrische Positionalität« aus. Will sagen, der Mensch ist von Natur aus nie ganz bei sich, und erst dies schafft ihm den Spielraum für Heiterkeit und Tränen.

Dagegen hat nicht erst Darwin in seiner Spätschrift »Der Ausdruck der Gemütsbewegungen bei den Menschen und den Tieren« behauptet, dass menschliches Lachen eine animalische Komponente enthält. Schon Mitte des 17. Jahrhunderts erblickte der Philosoph Thomas Hobbes im Lachen nichts als wölfische Schadenfreude, das »plötzliche Gefühl der eigenen Überlegenheit angesichts fremder Fehler«.

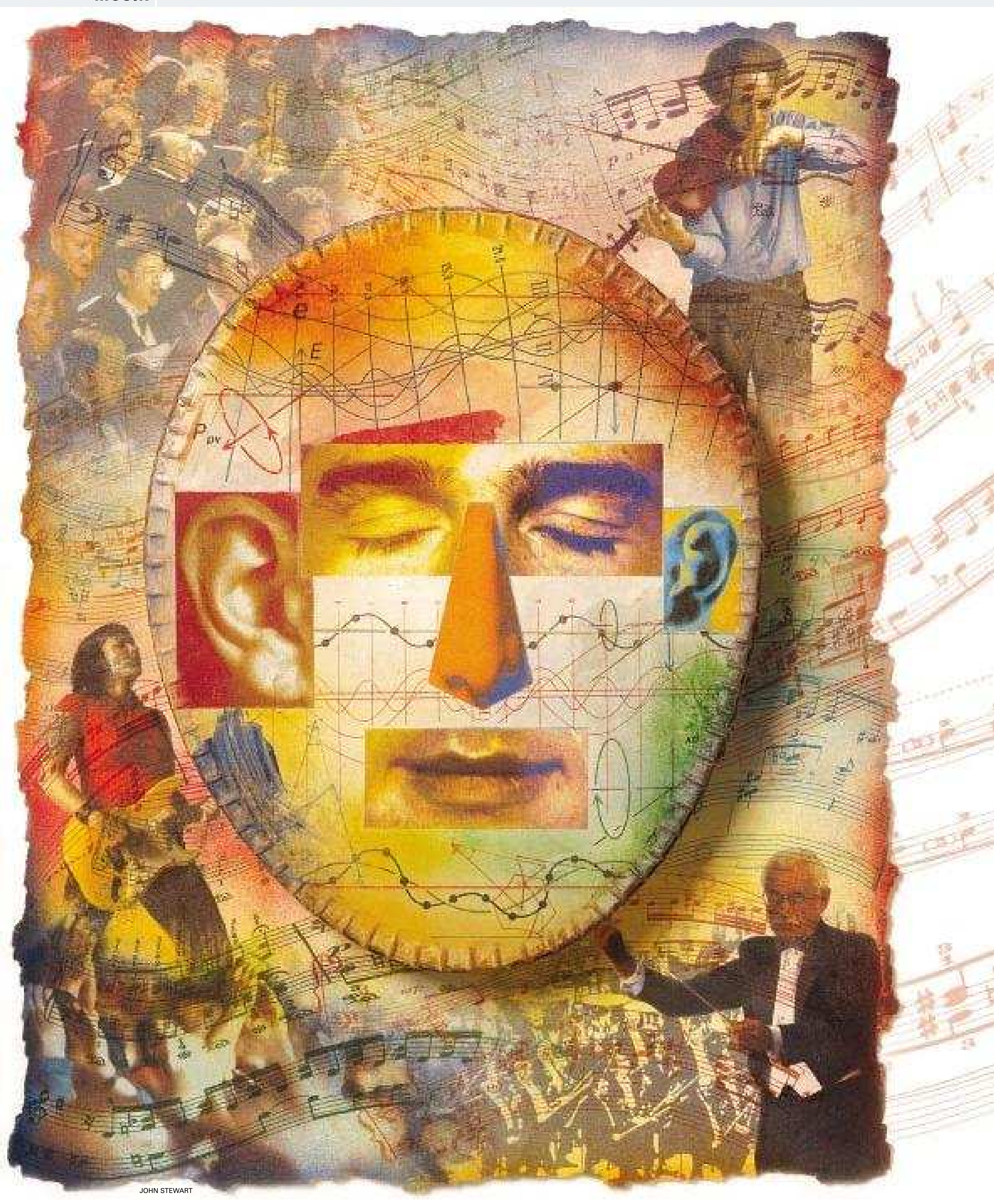
Elias Canetti, Literaturnobelpreisträger von 1981, vermeinte im Zähneblecken beim Lachen gar versteckte Raubtiergelüste zu erkennen: »Ein Mensch, der fällt, erinnert an ein Tier, auf das man aus war und das man selber zu Fall gebracht hat. Jeder Sturz, der Lachen erregt, erinnert an die Hilflosigkeit des Gestürzten; man könnte es, wenn man wollte, als Beute behandeln ... Man lacht, anstatt es zu essen.«

Besonders die Biologen betonen seit Darwin die Gemeinsamkeiten im Verhalten von Mensch und Tier. Nicht nur wir lachen, wenn man uns kitzelt – Affen, Hunde und Ratten tun es ebenfalls. Während Schimpansen einander zum Spaß durch die Äste jagen, stoßen sie ein rhythmisches »Spielkeuchen« aus, das offenbar ihre Art ist zu kichern. Verspielte Ratten quieken, wenn man sie kitzelt, mit einer wohl für großes Behagen typischen Frequenz von 50 Kilohertz, entwickeln eine enge soziale Bindung an den Kitzelnden und suchen die Nähe anderer Ratten, die auch so quieken.

Der Neurowissenschaftler Jaak Panksepp von der Bowling Green State University (US-Bundesstaat Ohio) knüpft daran nun kühne Spekulationen: Noch habe niemand untersucht, ob Ratten Humor hätten, doch wenn ja, müsse er von der deftigen Art des Slapsticks sein. Das schließt Panksepp aus dem Erfindungsreichtum, mit dem junge Nager einander necken und dabei »lachen« *(»Science«, 1. 4. 2005, S. 62)*. Er hat schon Ratten gezüchtet, die beim Herumtollen besonders viel quieken, und hofft, so den Genen für Fröhlichkeit auf die Spur zu kommen. Am Ende winken, so Pankepp, »neue Moleküle« gegen Depression und Manie.

Übrigens sah selbst der Idealist Friedrich Schiller, dessen 200. Todesjahr wir gerade andächtig feiern, in Gelächter, Frohsinn, zweckfreiem Vergnügen und absichtslosem Spiel keineswegs ein Privileg des Menschen. In seinem 27. Brief »Über die ästhetische Erziehung des Menschen« schrieb er: »Das Tier arbeitet, wenn ein Mangel die Triebfeder seiner Tätigkeit ist, und es spielt, wenn der Reichtum der Kraft diese Triebfeder ist, wenn das überflüssige Leben sich selbst zur Tätigkeit stachelt.« Schiller ging so weit, dieses »überflüssige Leben«, das heißt den verschwenderischen Reichtum natürlicher Formen und biologischer Arten, als reinen Spieltrieb der lebendigen Natur zu interpretieren.

Mit Schillers Augen betrachtet, erscheint Darwins unerbittlicher Daseinskampf auf einmal als ästhetisches Spiel. Das reizt vielleicht nicht zum Lachen, stimmt aber doch heiter.



JOHN STEWART

Wie Musik im Gehirn spielt

Woher kommt die seltsame Macht der Musik? Forscher belauschen das Gehirn beim Hören und eigenen Musizieren. Die Hirnzellen reagieren darauf erstaunlich plastisch.

Von Norman M. Weinberger

Musik kann Menschen bis zu Tränen rühren. Warum bewegt sie uns so stark, dass kaum ein Film, kaum ein Werbespot mehr darauf verzichten mag? Kinder beruhigt man mit Liedern. Bei manchen Sportveranstaltungen wird Musik eingesetzt, um die Massen aufzupeitschen.

Mindestens seit einigen zehntausend Jahren schlagen Menschen auf Klangkörper, spielen Maultrommel, blasen auf Knochenflöten und bringen aufgespannte Sehnen zum Schwingen. Wahrscheinlich ist uns die Liebe zur Musik angeboren. Jede Kultur pflegt ihre Tonkunst und Klangtradition. Und schon zwei Monate alte Säuglinge unterscheiden Wohl- und Missklänge. Wenn uns eine Sinfonie ergreift, erregt das im Gehirn die gleichen Lustzentren wie beim Konsum von Schokolade, von Kokain oder beim Sex.

Aus welchem Grund – oder zu welchem Zweck – entstand Musik? Und wie kommt es, dass sie unsere Gefühle anspricht? Warum ist sie dem Menschen so wichtig, dass er sie nicht missen mag? Wissenschaftler haben dafür verschiedene Erklärungen vorgeschlagen – so von evolutionsbiologischer Seite, in der Frühzeit habe Musik zum Überleben des Menschen beigetragen. Beispielsweise stellt sich der Evolutionspsychologe Geoffrey F. Miller von der Universität von New Mexico in Albuquerque vor, dass Musik den Paarungspartner beeindruckte, also ein Faktor bei der sexuellen Selektion des Menschen war. Robin M. Dunbar von der Universität Liverpool vermutet hingegen, Musik habe geholfen, die Horden zusammenzuhalten, die irgendwann so groß wurden, dass gegenseitiges Lausen als sozialer Kitt nicht mehr reichte. Dagegen behauptet Steven Pinker von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), Musik sei eher der »Käsekuchen fürs Ohr«. Durch einen glücklichen Zufall seien in unserer Evolution Zutaten zusammengekommen, die dem Gehirn schmeicheln, weil sie sich so wunderbar ergänzen.

Noch kennen Neurowissenschaftler die Wahrheit nicht. Zumindest aber lernen wir in den letzten Jahren immer mehr darüber, wo und wie das Gehirn Musik verarbeitet. Dabei ergänzen sich Beobachtungen an Hirnversehrten und Studien mit gesunden Testpersonen, deren Gehirnaktivität mit bildgebenden Verfahren dargestellt wurde. Eine große Überraschung war, dass im Gehirn offenbar kein spezielles Musikzentrum existiert. Wenn der Mensch Musik hört oder ausübt, sind etliche weit verteilte Areale aktiv, auch welche, die sich normalerweise mit anderen kognitiven Aufgaben befassen. Wie sich außerdem herausstellte, ändern sich die aktiven Bereiche abhängig von Erfahrung und musikalischer Betätigung.

Bei der geringen Zahl der Hörzellen ist das besonders erstaunlich. Kein anderes Sinnesorgan benutzt so wenige Sin- ▷

◀ **Musizieren gehört vermutlich zum Urerbe des Menschen, denn unser Gehirn scheint für Musik wie geschaffen zu sein.**

▷ neszellen wie das Ohr. Im Auge sitzen rund 100 Millionen Lichtrezeptoren. Die Haarzellen im Innenohr kommen lediglich auf etwa 3500. Doch das genügt, damit das Gehirn sich verändert, sodass es schon nach kurzen Musikübungen künftig mit musikalischen Eindrücken anders umgeht. In dieser Hinsicht sind wir bemerkenswert anpassungsfähig – unser Gehirn ist für Musik auffallend plastisch.

»Die Oper ist in meinem Kopf!«

Vor den Zeiten der modernen Gehirnbildgebung sammelten die Forscher ihr Wissen über die Musikverarbeitung hauptsächlich an Schlaganfallpatienten und anderen Hirnkranken oder Hirnverletzten. Darunter war mancher Musiker. Beispielsweise konnte der französische Komponist Maurice Ravel (1875–1937) ab 1933 keine neuen Stücke mehr notieren. Vermutlich litt er an einer fokalen zerebralen Degeneration, wobei einzelne Bereiche des Gehirngewebes verkümmern. Ravel behielt sein musikalisches Vorstellungsvermögen. Seine alten Kompositionen vermochte er noch zu erkennen und sich ins Gedächtnis zu rufen. Tonleitern konnte er noch spielen. Einem Freund vertraute er damals über ein geplantes Projekt an: »... diese Oper (Johanna von Orleans) ist hier, in meinem Kopf! Ich höre sie, aber ich werde sie nie aufschreiben. Es ist vorbei! Ich kann meine Musik nicht mehr schreiben!« Vier Jahre später starb der Künstler nach einer Gehirnoperation. Sein Fall unterstützt die Beobachtungen, dass es im Gehirn offenbar kein eigentliches Musikzentrum gibt.

Der russische Komponist Wissarion Schebalin (1902–1963) vermochte in seinen letzten zehn Lebensjahren nach einem Schlaganfall nicht mehr zu sprechen und auch Sprache nicht mehr zu verstehen. Doch komponieren konnte er noch. Unter anderem das ließ Neurophysiologen vermuten, dass Musik und Sprache unabhängig voneinander verarbeitet werden. Allerdings sehen die Forscher das inzwischen differenzierter. Beide Phänomene haben durchaus einiges gemeinsam: Sprache wie Musik wollen etwas mitteilen, und beide haben eine Syntax, einen Satz an Regeln für die passende Kombination der Elemente, in dem Fall Wörter beziehungsweise Noten. Der Hirnforscher Aniruddh D. Patel vom Neurosciences Institute der Universität von Kalifornien in San Diego schließt aus Hirnaufnahmen, dass für die Syntax anscheinend in beiden Fällen derselbe Bereich der Stirnhirnrinde zuständig ist. Für einige andere Schritte der Verarbeitung von Sprache beziehungsweise Musik gilt Ähnliches.

Wie das Gehirn reagiert, wenn Musik erklingt, darüber haben wir von Gehirnaufnahmen mit modernen bildgebenden Techniken schon eine recht detaillierte Vorstellung. In vielem gleichen die Vorgänge natürlich dem, wie das Hörsystem auch sonst Klänge und Geräusche verarbeitet (Kasten rechts). In gewisser Weise ist dieses Sinnessystem, wie andere auch, hierarchisch aufgebaut. Die neuronalen Erregungen durchlaufen vom Ohr bis zur Hörrinde im Schläfenlappen, der höchsten Stufe der Hörbahn, mehrere Verarbeitungsstationen.

Schon im Innenohr – in der Schnecke, wo die Sinneszellen sitzen – werden komplexere Töne und Klänge in ihre Frequenzen zerlegt. Ein Geigenton etwa setzt sich aus mehreren überlagerten Schwingungen zusammen, auf die jeweils andere Sinneszellen ansprechen. Im Hörnerv fließen die Teilinformationen dann über getrennte Stränge als Serien elektrischer Entladungen zur nächsten Station. In der Art geht es weiter bis zur Hörrinde. Charakteristisch ist, dass die einzelnen Nervenzellen des Hörsystems jeweils bei einer bestimmten Tonfrequenz optimal reagieren. Etwas schwächer sprechen sie bei davon leicht abweichenden Tonfrequenzen an. Hierauf reagieren wiederum benachbarte Zellgruppen stärker. Dadurch verschiebt sich die Empfindlichkeit für unterschiedlich hohe Töne auf der Hirnrinde kontinuierlich (siehe Kasten S. 34). Misst man, welche Neuronen bei einer bestimmten reinen Schwingung antworten, erhält man kleine Felder, die sich bei angrenzenden Schwingungen überlappen. Neurophysiologen können so auf der Hörrinde regelrechte Frequenzenlandkarten zeichnen.

Dieses grobe Schema erklärt noch nicht, wie Musik verarbeitet wird, wie das Gehirn Beziehungen zwischen Tönen herstellt, also Melodien, Rhythmen, Klänge, Klangfolgen erfasst oder die Lautstärke und Klangfarbe (das Frequenzspektrum) von Tönen registriert. An diesen Vorgängen beteiligen sich, wie wir heute wissen, eine Reihe weiterer Hirngebiete, jedes zuständig für bestimmte Aspekte.

Scharfstellen auf wichtige Töne

Bei diesen Leistungen reagiert das Gehirn keineswegs starr. Früher vermuteten die Wissenschaftler beispielsweise, dass bei einer bestimmten Tonfrequenz immer dieselben Zellen in immer gleicher Weise ansprechen würden. Hieran kamen David M. Diamond, Thomas M. McKenna und mir Zweifel, als wir Ende der 1980er Jahre bei Katzen an kurzen Tonfolgen testeten, ob die Kontur (das Muster des Auf und Ab, das auch eine Melodie prägt) die Reaktion einzelner Zellen der Hörrinde beeinflusst. Wir verwendeten immer die gleichen fünf unterschiedlich hohen Töne, variierten aber die Reihenfolge und somit die Kontur – wir präsentierten den Katzen gewissermaßen lauter verschiedene kleine Melodien.

Zu unserer Verblüffung veränderte sich die Antwortstärke der einzelnen Hirnzellen auf »ihren« Ton – genauer gesagt auf ihren optimalen Frequenzbereich – abhängig von dessen Position in der Tonabfolge. So kam es vor, dass eine Zelle stärker ansprach, wenn »ihr« Ton nicht an erster Position stand. Es war auch nicht egal, ob der Ton in eine auf- oder in eine absteigende Folge eingebaut war, oder ob die Richtung innerhalb der Kontur wechselte. Das beweist, dass diese Verarbeitung nach einem anderen Prinzip funktioniert als etwa die Tonweitergabe über Lautsprecher oder Telefon. ▷

IN KÜRZE

▶ Wahrscheinlich war Musik von Anbeginn **Teil der menschlichen Kultur**. Die Liebe zur Musik liegt tief in uns und dürfte angeboren sein.

▶ Eine **Anzahl von Hirnregionen** spricht jeweils auf die einzelnen Komponenten von Klängen und Musikstücken an. Dabei verändert sich das Gehirn passend zu deren Bedeutung für den Einzelnen.

▶ Tief verwurzelt ist auch das **Gefühlserleben von Musik**. Es funktioniert unabhängig vom aktiven Musikverstehen.



Wege eines Klangs

Beim Musikhören wirken außer der Hörrinde im Schläfenlappen etliche weitere Hirngebiete mit, auch solche, die an sich mit anderen Arten von Denken umgehen. Wo das Gehirn Musik verarbeitet, hängt von den verschiedensten individuellen Erfahrungen ab.

Schallwellen
ein zusammengesetzter Geigenton
Trommelfell
Steigbügel (eines der Gehörknöchelchen)
Schnecke mit den Hörsinneszellen im Innenohr

Das Ohr verwandelt die Druckwellen der Klänge über Trommelfell und Gehörknöchelchen in Flüssigkeitswellen, welche der Druck des Steigbügels in der Schnecke erzeugt.

Schwingungen der Basilarmembran stimulieren die Haarzellen (die Hörsinneszellen), dem Hörnerv elektrische Signale zu übermitteln. Dieser schickt seine Signale ins Gehirn. Jede Haarzelle ist auf eine bestimmte Schwingungsfrequenz gestimmt.

entrollte Gehörschnecke
Schnitt durch die Schnecke
Fasern des Hörnervs
200 Hz
800 Hz
1600 Hz
Basilarmembran
Haarzelle

Einzelne Fasern des Hörnervs leiten Signale zu je verschiedenen Nervenzellen, die auf unterschiedliche Frequenzen gestimmt sind.

motorische Hirnrinde
Hörrinde
Ebene des Querschnitts links unten
Thalamus
Hörrinde
Kleinhirn
Hirnstamm

Das Gehirn verarbeitet Musik sowohl hierarchisch als auch die einzelnen Komponenten parallel, das heißt nebeneinander. Eine der Schaltstellen auf dem Weg zur Hörrinde ist der Thalamus. In der primären Hörrinde erfolgen die ersten Schritte der Musikerkennung – wie das Erfassen von Tonhöhe und Melodiekontur. Deren Zellen passen sich an Musikerfahrungen an. Diese Umstimmung weitet sich auf sekundäre Hörrindenfelder aus und berührt auch andere assoziierte Gebiete, die wahrscheinlich für komplexere Muster von Musik wie Harmonie, Melodie und Rhythmus zuständig sind.

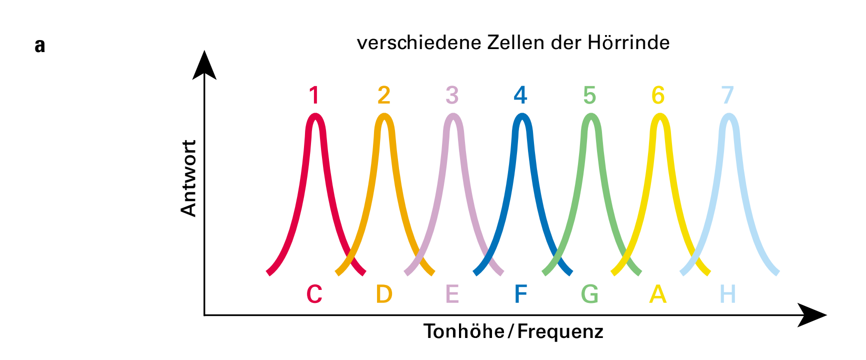
Beim Musizieren sind unter anderem das Kleinhirn und die motorische Hirnrinde angeregt.

ANDREW SWIFT

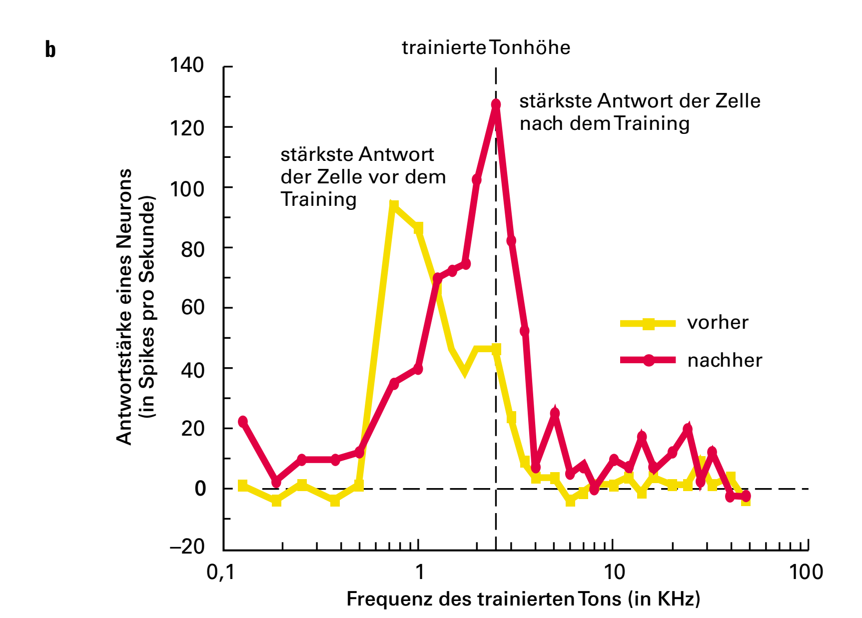
Übung stimmt Hirnzellen um

Die einzelnen Neuronen der Hörrinde – auch bei Tieren – reagieren jeweils bevorzugt bei einer bestimmten Tonfrequenz (a). Gewinnt nun ein bestimmter Ton für das Tier aus irgendwelchen Gründen mehr Bedeutung, verschieben Zellen für ähnliche Töne ihr Optimum hin zu dessen Frequenz (b). Die »Landkarte« auf der Hörrinde passt sich an das Gelernte an und gibt dem wichtigen Ton mehr Raum – hier am Beispiel von dressierten Ratten (c).

a



b



c



LAURIE GRACE

▷ Die meisten Studien zur Musikverarbeitung haben sich bisher mit Melodien befasst. Einige Erkenntnisse gibt es aber auch schon zum Rhythmus, zur Harmonie (wenn mindestens zwei Töne gleichzeitig erklingen) und zur Klangfarbe (dem unterschiedlichen Klang etwa des gleichen Geigen- und Flötentons, was auf einem unterschiedlichen Obertonspektrum bei gleicher Grundfrequenz beruht). So scheinen sich beim Rhythmus die beiden Hirnhälften nicht in gleichem Maße zu beteiligen. Allerdings sind die Ergebnisse nicht eindeutig, welche Hirnhälfte nun stärker mitarbeitet. Offenbar hängt das jeweils von der Art der Aufgabe ab, aber auch vom spezifischen Rhythmus selbst. Der linke Schläfenlappen scheint sich bei kürzeren Tönen einzuschalten. Versuchen wir also Rhythmen mit kurzen Noten zu erkennen, benutzen wir dazu wohl mehr die linke Seite – und umgekehrt.

Bei Harmonien ist die Situation eindeutiger. Achten Versuchspersonen auf Harmonieaspekte von Musik, beteiligen sich Hörbereiche auf dem rechten Schläfenlappen stärker als jene auf dem linken. Gleiches scheint für die Klangfarbe zu gelten. Sollen Testteilnehmer Instrumente am Klang erkennen, arbeitet besonders die rechte Seite. Patienten, denen der rechte Schläfenlappen fehlt – wenn er etwa wegen eines Anfallsleidens entfernt werden musste –, können schlecht Klangfarben erkennen. Nach einer linksseitigen Operation ist das nicht der Fall.

Besonders spannend ist, dass viele solcher Reaktionen auch abhängig von Erfahrung und Übung variieren. Schon ein kleines bisschen Training kann sich schnell auswirken. Noch vor ungefähr zehn Jahren glaubten die Wissenschaftler zum Beispiel, dass die optimale Frequenz für jede Zelle im Hörkortex unveränderlich festliegt. Als wir die oben beschriebenen Konturstudien mit den Katzen durchführten, kamen uns daran Zweifel. Es schien, als würden manche Zellen plötzlich für Töne besonders empfindlich, die dem Tier etwas bedeuten und die es sich deshalb merkt.

Genauer untersuchten Jon S. Bakin, Jean-Marc Edeline und ich diese These in den 1990er Jahren in einer Reihe von Experimenten an Meerschweinchen. Wir wollten prüfen, ob sich die Organisation der Hörrinde grundlegend verändert, wenn das Tier einen wichtigen Ton lernt. Zuerst spielten wir den Meerschwein-



chen eine Anzahl von Tönen vor und maßen, bei welchen die Reaktionen in der Hörrinde besonders stark ausfallen und bei welchen eher schwach. Nun wählten wir einen Ton, der wenig Reaktion hervorrief. Mit diesem Ton zusammen verpassten wir den Tieren einen leichten elektrischen Schlag am Fuß. Die Nager lernten den Zusammenhang in ein paar Minuten.

Tonlandkarten im Gehirn vom Meerschweinchen

Gleich nach dem Training sowie in Intervallen in den folgenden zwei Monaten prüften wir erneut das Verhalten derselben Hirnzellen. Und wirklich hatten sich die Verhältnisse verändert. Der antrainierte Ton erzeugte deutlich mehr Reaktion als vorher. Zellen hatten ihre optimale Frequenz zu der des Signaltons hin verschoben. Das bedeutet: Die Zellen der Hörrinde werden durch Erfahrung sozusagen neu gestimmt, sodass genügend viele bei bedeutenden Signalen mitwirken. Auch im weiteren Umfeld der jetzt scharf gestimmten Nervenzellen hatten sich die bevorzugten Frequenzen versetzt. Das Gehirn hatte seine Landkarte berichtigt. Jetzt passte sie wieder auf die relevanten Umweltereignisse. Umgekehrt braucht man nur die Frequenzlandkarte im Hörkortex zu studieren, um zu erkennen, welche Töne dem Tier wichtig sind. Die neue Stimmung der Hirnzellen war bemerkenswert dauerhaft. Der Effekt wuchs in der ersten Zeit ohne weiteres Training. Danach blieb er monatelang bestehen.

Diese Ergebnisse regten die Hirnforscher zu neuen Untersuchungen über die neuronale Plastizität an. Wie es aussieht, besteht für das Gehirn ein Weg, um den Rang von neuerdings wichtigen Stimuli einzuspeichern, darin, für das Signal mehr Zellen zur Verfügung zu stellen. Lernt das Tier die Bedeutung eines Reizes, vermag das Gehirn ihm mehr Verarbeitungskapazität zuzuordnen (siehe Kasten links).

Bei Menschen kann man das Verhalten einzelner Hirnzellen beim Erlernen von Tönen oder Melodien nicht messen. Jedoch können moderne Aufnahmetechniken offenbaren, ob Zellpopulationen auf der Hirnrinde in der Größenordnung von Tausenden von Neuronen ihre durchschnittliche Reaktionsstärke ändern. Ein Team um Ray Dolan vom University College London trainierte 1998 Versuchspersonen auf einen bestimmten Ton. Währenddessen erhöhte sich ganz ähnlich wie im Tierversuch die Reaktionsbereitschaft der Hirnzellen auf den spezifischen Reiz; der Bereich für den Stimulus erweiterte sich. Übertragen auf komplexere Aspekte von Musik könnten lang anhaltende Lerneffekte dieser Art mit erklären, warum man im Lärm eine vertraute Melodie heraushört, oder warum Alzheimerkranke bei weit gehend verlorenem Erinnerungsvermögen sich an von früher bekannte Musikstücke noch erinnern.

Ein interessantes Phänomen ist das innere Hören von Musik. Wohl jeder erlebt manchmal, dass ihm eine Melodie nicht aus dem Sinn geht. Wo im Kopf spielt diese Musik? Andrea R. Halpern von der Bucknell University in Lewisburg (Pennsylvania) und Robert J. Zatorre von der McGill University in Montreal (Kanada) sind dem 1999 in einer Studie mit Nichtmusikern nachge- ▷

gangen. Sie registrierten aktive Stellen des Gehirns, während die Leute einem Musikstück entweder wirklich lauschten oder aber es vor ihrem inneren Ohr erklingen ließen. Beim rein imaginierten Zuhören waren tatsächlich viele der Schläfenlappenbereiche aktiv, die sich auch sonst am Musikhören beteiligen.

Hochsensible Musikergehirne

Viele der geschilderten Effekte zeigen sich bei Musikern noch ausgeprägter. In manchem scheinen deren Gehirne infolge der intensiven Beschäftigung damit die Musik sogar anders zu verarbeiten. Die Studien bestätigen ganz klar, dass unser Gehirn dazu fähig ist, auf solche Einflüsse hin neuronale Verschaltungen umzuarbeiten. Wenn schon eine kurze Trainingsphase genügt, um mehr Hirnzellen auf einen wichtigen Ton einzustimmen, ist es vielleicht gar nicht so erstaunlich, dass ausgiebige musikalische Betätigung die Sensibilität noch viel deutlicher verstärkt und selbst größere Änderungen nach sich zieht. Das jahrelange täglich stundenlange Musizieren bewirkt nicht nur, dass manche Hirngebiete außerordentlich ausgeprägt sind, sondern es macht auch für die speziellen Anforderungen empfindlich.

Bei einer Studie von 1998, die Christo Pantev von der Universität Münster leitete, kam heraus, dass bei Musikern, die Klaviermusik zuhören, hierbei auf der linken Hirnseite rund 25 Prozent mehr von den Hörregionen reagieren als bei Nichtmusikern. Das gilt allein im Zusammenhang mit Musik, nicht für andere akustische Ereignisse, selbst wenn die Töne oder Klänge sonst ähnlich sind. Wie die Forscher auch feststellten, ist der reagierende Bereich umso größer, je früher jemand mit dem Musikunterricht begann.

Musikerziehung scheint sogar die kindliche Entwicklung zu beschleunigen. Forscher der McMaster University in Ontario (Kanada) ermittelten kürzlich bei Vier- und Fünfjährigen die Gehirnaktivität bei Klaviermusik, Geigenmusik und reinen Tönen. Bei Kindern, die zu Hause viel Musik zu hören bekamen, reagierten die entsprechenden Hirnbereiche stärker als bei denen ohne ein solches Umfeld. Die an Musik gewöhnten Kinder entsprachen hierin drei Jahre älteren Kindern ohne intensive Musikerfahrung.

Die ausgeprägtere Reaktion des Musikergehirns dürfte zu einem Teil schon durch eine größere Hörrinde bedingt sein. Peter Schneider von der Universität Heidelberg und seine Mitarbeiter fanden 2002 bei Musikern eine Volumenzunahme dieses Bereichs um 130 Prozent. Die Forscher entdeckten dabei, dass die Vergrößerung umso stärker ausfällt, je ausgiebiger sich jemand mit Musik beschäftigt. Anscheinend wächst proportional zum Grad musikalischer Betätigung die Zahl an Musik verarbeitenden Nervenzellen in der Hörrinde. Erstaunlicherweise ergab eine neuere Studie, die Pantev an der Universität Toronto (Kanada) durchführte, dass die Sensibilität des Gehirns auch vom eigenen Instrument der Testperson abhängt. Bei Trompetern etwa reagieren bestimmte Hirngebiete verstärkt auf Trompetentöne, nicht aber auf Geigenklänge.

Abgesehen von der Hörrinde verändern sich durch Musikausübung auch andere beim Musizieren beteiligte Gehirngebiete. Instrumentalisten haben anscheinend nicht nur ein größeres Kleinhirn – das sich an der Bewegungskoordination beteiligt –, sondern auch vergrößerte motorische Areale in der Großhirnrinde. Spezifisch die Felder für die Kontrolle der erforderlichen Fingerbewegungen sind ausgedehnter. Mitte der 1990er Jahre wies eine Gruppe um Thomas Elbert von der Universität Konstanz nach, dass bei Geigern Hirnrindenbereiche für Sinnesinformationen des zweiten bis fünften Fingers der linken Hand stärker ausgebildet sind als für die rechte Hand. Eben mit diesen vier Fingern greift ein Geiger die Töne auf den Saiten. Die entsprechenden Gebiete für die rechte, die Bogenhand, sind bei ihnen nicht übermäßig auffallend.

Folgen frühen Übens

Überdies müssen viele Instrumentalisten beide Hände besonders gut koordinieren können. Tatsächlich erscheint der dicke Faserstrang zwischen beiden Großhirnhälften – der so genannte Balken – in seinem vorderen Teil, in dem die Verbindungen zwischen rechtem und linkem motorischem Areal verlaufen, dicker als bei Nichtmusikern. Auch da ist der Un-

Für Musik geboren

Jeder ist musikalisch, zumindest in gewissem Grad. Man beobachte nur Kinder. Noch ehe Babys Sprache wirklich verarbeiten können, zeigen sie ausgeprägte Reaktionen auf Musik. Vielleicht deswegen sprechen wir mit ihnen instinktiv im Singsang. Das ist in allen Kulturen so.

Die Kleinen beeinflussen unseren Ausdruck mehr, als wir selbst merken. Als indische und nordamerikanische Mütter das gleiche Wiegenlied vorsingen sollten, einmal für ihr Kind, einmal in dessen Abwesenheit, konnten andere Leute die Aufnahmen später klar unterscheiden, unabhängig von der Sprache. Auf das Kind gerichtete Merkmale waren in beiden Kulturen die gleichen.

Mit geschickten Testverfahren haben Forscher herausgefunden, dass Kleinkinder benachbarte Töne ähnlich gut unterscheiden können wie Erwachsene. Sie bemerken auch Tempiveränderungen und Rhythmenwechsel. Eine Melodie erkennen sie auch wieder, wenn diese höher oder tiefer erklingt.

Nach einer neueren Studie bevorzugen schon zwei bis sechs Monate alte Kinder konsonante Klänge vor dissonanten. Das Musiklernen fängt sogar schon vor der Geburt an. Ungeborene Kinder reagieren auf die Erkennungsmelodie einer beliebten Fernsehserie, die die werdende Mutter täglich anschaute, anders als auf eine neue Weise.



ESTOCK PHOTO, IT INTERNATIONAL

Wenn wir mit Babys »sprechen«, befolgen wir musikalische Regeln.



ALEXANDER MARSHACK

▲ **Vor mindestens 32000 Jahren schnitzten Menschen diese Knochenflöte, die in Frankreich ausgegraben wurde.**

terschied wieder umso größer, je früher der Musikunterricht anfing.

Wenig ist noch darüber bekannt, wie Musik Emotionen auslöst. Pionierforschung auf dem Gebiet leistete Anfang der 1990er Jahre der Musikpsychologe John A. Sloboda von der Keele University in Staffordshire (England). Vier von fünf befragten Erwachsenen kannten aus eigenem Erleben, dass Musik sie stark erregte oder erschütterte, dass sie Schauder, Lachen oder Tränen hervorrief. In einer Studie von Jaak Panksepp von der Bowling Green State University (Ohio) Mitte der 1990er Jahre, an der mehrere hundert junge Menschen teilnahmen, kam heraus, dass über zwei Drittel von ihnen Musik mochten, weil sie Gefühle auslöst. Hierzu passen Ergebnisse einer 1997 durchgeführten Untersuchung, die Carol L. Krumhansl und ihre Mitarbeiter von der Cornell University (Ithaca) durchführten. Die Forscher spielten Versuchspersonen Musikstücke vor, die vermeintlich Freude, Traurigkeit, Angst oder Spannung ausdrücken. Zugleich maßen sie unter anderem Herzschlag, Blutdruck und Atmung. Und wirklich zeigten die Teilnehmer je nach Kategorie andere körperliche Reaktionen, aber bei derselben Kategorie jeweils ein ähnliches Muster.

Einzelheiten über die Hirnmechanismen fügen sich erst langsam zusammen. Oft sind das Zufallsbeobachtungen wie der Fall einer Patientin, die bei beidseitigen Läsionen der Schläfenlappen auch Verletzungen an beiden Hörrinden erlitt. Die Frau hat keine Sprachschwierigkeiten. Auch Intelligenz und allgemeines Erinnerungsvermögen sind normal geblieben. Melodien kann sie aber weder erkennen noch völlig verschiedene Weisen voneinander unterscheiden oder Musikstücke überhaupt irgendwie zuordnen. Sie weiß nicht, ob sie ein Stück zum ersten Mal hört oder ob es ihr gerade wiederholt vorgespielt wurde. Selbst einst vertraute Melodien kommen ihr völlig fremd vor. Trotzdem reagiert diese Patientin auf Musik verschiedenen emotionalen Gehalts ganz normal, mit den gleichen Gefühlen wie andere Menschen – und sie hört gern Musik. Demnach scheint die Hörrinde im Schläfenlappen zwar für das Melodieerkennen wichtig zu sein, ist offenbar aber verzichtbar, um Musik mit Gefühl zu belegen. Das geschieht unterhalb der Großhirnrinde mit Beteiligung der Stirnlappen.

Hochgefühle vom Belohnungssystem

Anne Blood und Zatorre von der McGill University verglichen 2001, welche Gehirngebiete bei Klängen reagieren, die Menschen als Konsonanz oder Dissonanz empfinden, also als Wohl- oder Missklang. Wie sich zeigte, werden davon unterschiedliche Stellen aktiviert. Konsonante Akkorde stimulierten den rechten Orbitallappen, ein Areal des Stirnhirns und Teil der Assoziationsrinde. Dieses Gebiet gehört zum Belohnungssystem des Gehirns. Auch Teile einer Region unterhalb des Balkens, der Verbindung zwischen den beiden Hirnhälften, waren einbezogen. Bei dissonanten Akkorden geschah etwas anderes: Nun meldete sich die rechte parahippocampale Gehirnwindung. Daraus folgt, dass beim emotionalen Erfassen eines Musikstücks mindestens diese beiden Systeme anspringen können. Wie die einzelnen Aktionsmuster des Hörsystems im speziellen Fall mit jenen Systemen zusammenarbeiten, ist allerdings noch unklar.

Viel Beachtung fand eine Studie von Blood und Zatorre an Musikern über das Hochgefühl beim Musikhören. In solchen Momenten glich deren Gehirnaktivität teilweise dem Zustand im Zusammenhang mit gutem Essen, sexueller Betätigung oder auch Drogenkonsum. Die Freude, die Musik geben kann, aktiviert einige derselben Schaltkreise des so genannten Belohnungssystems unseres Gehirns.

All diese Befunde weisen auf eine biologische Grundlage für Musik hin. Das Gehirn scheint darauf angelegt zu sein, sich mit Melodien, Rhythmen und Klängen zu befassen. Eine Reihe von Hirnregionen beteiligt sich an der Verarbeitung, wobei jede spezielle Aufgaben übernimmt – so viel kristallisiert sich bereits jetzt heraus. Dass Musikergehirne anscheinend zusätzliche Spezialisierungen aufweisen, insbesondere dass sich einige Strukturen größer als normal ausprägen, ist nicht zuletzt für die Lernforschung aufschlussreich. Beim Erlernen von Tönen und Klängen wird das Gehirn neu gestimmt. Dann verschieben einzelne Neuronen ihren Antwortbereich, und insgesamt reagieren bei wichtigen Klangereignissen mehr Zellen der Hirnrinde. Die Hirnforschung wird dazu beitragen, mehr über die Musik selbst zu erfahren – auch darüber, wie viele Fassetten sie hat und warum es Musik gibt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Norman M. Weinberger arbeitet in der Abteilung für Neurobiologie und Verhalten an der Universität von Kalifornien in Irvine. An der Universität gründete er das Zentrum für Neurobiologie von Lernen und Gedächtnis. Auch rief er das »Music and Science Information Computer Archive« ins Leben (www.musica.uci.edu/).

Die Magie der Musik in: Gehirn&Geist, Schwerpunktthema, 3/ 2005

Musik im Kopf in: Gehirn&Geist, 1/2001, S.18

Music, the food for neuroscience? In: Nature, Bd. 434, 17. März 2005, S. 312

The cognitive neuroscience of music. Von Isabelle Peretz und Robert J. Zatorre (Hg.). Oxford University Press, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

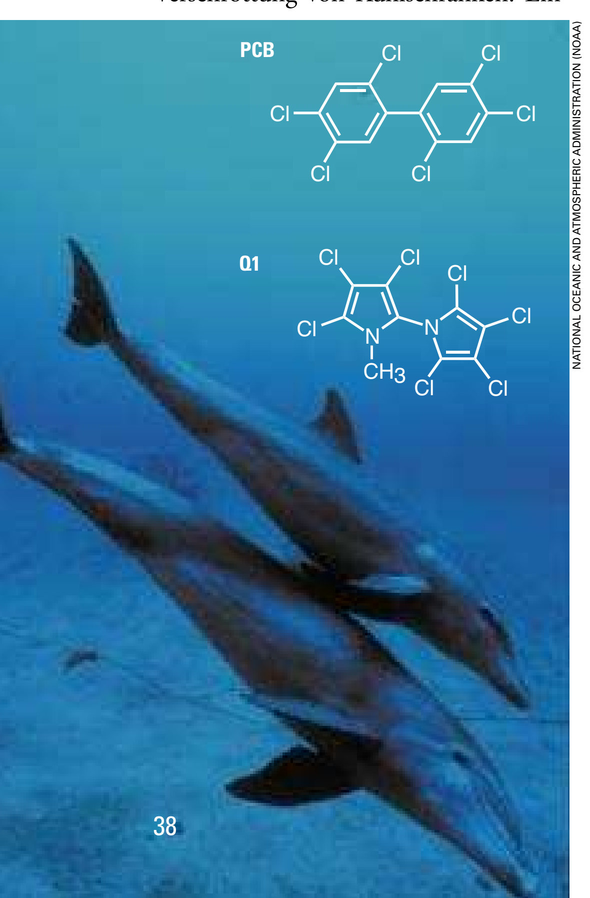
Umweltgifte vom Gabentisch der Natur

In der öffentlichen Meinung gelten Halogenverbindungen als Schadstoffe, mit denen die chemische Industrie unsere Umwelt verseucht. Doch die Natur produziert viele dieser und ähnlicher Substanzen auch selbst.

Von Gordon W. Gribble

Sie tragen die Hauptschuld am schlechten Image der chemischen Industrie: synthetische, chlorhaltige Chemikalien wie DDT (Dichlor-diphenyl-trichlorethan), Dioxin, PCBs (polychlorierte Biphenyle) und FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffe). Die einen wurden in großem Umfang als Insektizide ausgebracht, andere sind bei Unfällen ausgetreten und wieder andere schleichend entwichen – etwa bei der Verschrottung von Kühlschränken. Einmal in die Umwelt gelangt, haben sie sich dort festgesetzt und lokal, regional oder global große Schäden angerichtet – von der Verseuchung der Muttermilch bis zum Ozonloch.

Wer die chemische Industrie als Schöpfer dieses Teufelszeugs anprangert, übersieht allerdings, dass auch die Natur ähnliche und bisweilen identische Verbindungen in großen Mengen herstellt. Selbstverständlich kann dies kein Freibrief für eine ungehemmte Umweltverschmutzung sein. Doch die Erkenntnis, dass alles Natürliche nicht per se immer gut und harmlos sein muss, mag ein allzu schematisches Schwarz-Weiß-Denken relativieren, wie es heute in weiten Teilen der Öffentlichkeit vorherrscht. Sie kann zugleich dazu beitragen, manche von den Medien hochgespielte Umweltgefahr durch die Chemie realistischer einzuschätzen.



NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA)

◀ **Polychlorierte Biphenyle (PCBs) reichern sich in Fettgewebe an. Gleiches gilt aber auch für die natürliche marine Organochlorverbindung Q1. Viele Tiere, die sich ganz oder vorwiegend aus dem Meer ernähren und am Ende der Nahrungskette stehen, enthalten die Substanz deshalb in hoher Konzentration. Dazu gehören Delfine wie der Große Tümmler (links), Pinguine, Robben und auch Menschen, die große Mengen Walspeck verzehren.**

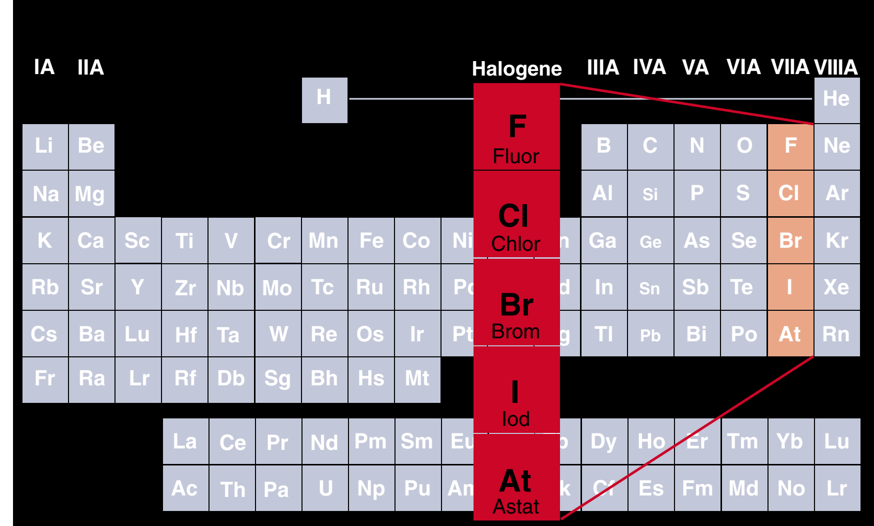
Selbst vielen Wissenschaftlern ist nicht bekannt, dass bei natürlichen Prozessen zahlreiche organische Verbindungen entstehen, die Chlor oder ein anderes Halogen enthalten. Was die Vielfalt der Synthesewege und die Komplexität der erzeugten Substanzen betrifft, ist die Natur den menschlichen Chemikern sogar weit überlegen. Ihre Produktpalette reicht vom einfachen Methylchlorid bis zu dem hoch komplizierten Antibiotikum Vancomycin. Bisher wurden 2320 natürlich vorkommende organische Chlor-, 2050 Brom-, 115 Iod- und 34 Fluorverbindungen tabelliert. Ob Bakterien, Pilze, Pflanzen oder Tiere – sie alle produzieren Halogenkohlenwasserstoffe, wir Menschen eingeschlossen. Es gibt aber auch abiotische Quellen wie Waldbrände, Vulkaneruptionen oder andere geothermische Vorgänge.

In welch hohem Maß die Natur halogenierte Moleküle erzeugt, wurde erst so richtig klar, als Chemiker, Pharmakologen und andere Wissenschaftler damit begannen, im Reich der Lebewesen systematisch nach nützlichen organischen Verbindungen zu fahnden. Marine Organismen erwiesen sich als reichste Quelle für Halogenkohlenwasserstoffe, was bei dem hohen Chlorid- und Bromidgehalt von Meerwasser kaum verwundert.

Wahrscheinlich rührt sogar der Geruch des Meeres teilweise von flüchtigen Organohalogenverbindungen aus Seegras her. Einige davon – wie Methylbromid, Methyliodid und Bromoform – dienen in der chemischen Industrie als Pestizide oder reaktive Zwischenprodukte. Die meisten Organohalogenverbindungen aus dem Meer waren für die ▷



Vulkane wie der Uzon in Sibirien stoßen – bei Ausbrüchen wie in Ruhephasen – gasförmige anorganische und organische Halogenverbindungen aus. Dazu gehören Methylhalogenide, Chloroform, Kohlenstofftetrachlorid und Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Am Ufer des heißen Kratersees gedeihen farbenprächtige Algen.



Verbindungsname	Formel	Halogen	Industrie	Natur
Fluorgas	F_2	F	ja	ja
Fluoressigsäure	$C_2H_3O_2F$	F	ja	ja
Fluorwasserstoff	HF	F	ja	ja
Tetrafluorethylen	C_2F_4	F	ja	ja
CFC-11	CCl_3F	F, Cl	ja	ja
2,4-Dichlorphenol	$C_6H_4OCl_2$	Cl	ja	ja
2,6-Dichlorphenol	$C_6H_4OCl_2$	Cl		ja
Tetrachlorkohlenstoff	CCl_4	Cl	ja	ja
Chlorgas	Cl_2	Cl	ja	ja
Chloressigsäure	$C_2H_3O_2Cl$	Cl	ja	ja
Chloroform	$CHCl_3$	Cl	ja	ja
Chlorphenol	C_6H_5OCl	Cl	ja	ja
Cryptophycin 1	$C_{35}H_{43}N_2O_8Cl$	Cl		ja
DDT (Dichlor-diphenyl-trichlorethan)	$C_{14}H_9Cl_5$	Cl	ja	
Dichlormethan	CH_2Cl_2	Cl	ja	ja
Dioxine (z. B. 1,3,6,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin)	$C_{12}H_4O_2Cl_2$	Cl	ja	ja
Epibatidin	$C_{11}H_{13}N_2Cl$	Cl		ja
Chlorwasserstoff	HCl	Cl	ja	ja
hypochlorige Säure	HClO	Cl	ja	ja
Lindan	$C_6H_6Cl_6$	Cl	ja	
Maracen A		Cl		ja
Methylchlorid	CH_3Cl	Cl	ja	ja
PCB (polychloriertes Biphenyl, z. B. 2,2',4,4',5,5'-hexachlorbiphenyl)	$C_{12}H_4Cl_6$	Cl	ja	
Punaglandin 1	$C_{27}H_{37}O_{10}Cl$	Cl		ja
Q1	$C_9H_3N_2Cl_7$	Cl		ja
Spongistatin 9	$C_{61}H_{91}O_{20}Cl$	Cl		ja
Vancomycin	$C_{66}H_{75}N_9O_{24}Cl_2$	Cl		ja
Kalihinol A (Antifouling-Wirkstoff)	$C_{22}H_{33}N_2O_2Cl$	Cl		ja
Telfairin	$C_{10}H_{14}Cl_3Br$	Cl, Br		ja
bromierte Dioxine (z.B. 1-Hydroxy-3,4,6,8-tetrabromdibenzo-p-dioxin)	$C_{12}H_4O_3Br_4$	Br		ja
Bromoform	$CHBr_3$	Br	ja	ja
Methylbromid	CH_3Br	Br	ja	ja
Panacen	$C_{15}H_{15}O_2Br$	Br		ja
Aplysiatoxin (erzeugt Schwimmerkrätze)	$C_{32}H_{47}O_{10}Br$	Br		ja
Methyliodid	CH_3I	I	ja	ja
Thyroxin	$C_{15}H_{11}NO_4I_4$	I		ja

▷ Wissenschaft jedoch neu und noch niemals von Menschenhand synthetisiert worden. Ihre tierischen oder pflanzlichen Produzenten verwenden sie meist zur Abwehr von Fressfeinden. Viele der Substanzen wirken antibakteriell oder gegen Fäulnis, einige aber auch als Sexuallockstoffe oder Hormone.

Halo-was?

Ein Halogen (wörtlich »Salzbildner«) ist ein Element, das über sieben äußere Elektronen verfügt – genau eines zu wenig für eine volle Valenzschale, mit der das Atom so stabil wäre wie ein Edelgas. Der Energiegewinn bei Aufnahme eines achten Elektrons ist beträchtlich, weshalb die Halogene das fehlende Teilchen in aggressiver Manier an sich zu reißen suchen. Chemiker beschreiben diese Eigenschaft als große negative Elektronenaffinität. Sie bedingt eine starke Neigung, sich mit anderen Elementen zu verbinden.

Da die Anzahl der äußeren Elektronen über die Stellung im Periodensystem entscheidet, stehen die Halogene alle in der siebten Spalte. Von den fünf Mitgliedern dieser Elementgruppe treten vier – Fluor (F), Chlor (Cl), Brom (Br) und Iod (I) – in biologischen Molekülen auf. Das letzte und größte Halogen, Astat (At), ist wegen seiner Radioaktivität instabil, sodass es in der Natur nicht vorkommt.

Selbst als reine Substanzen bleiben die Elemente der Gruppe VII nicht allein, sondern liegen im Gaszustand als zweiatomige Moleküle wie F_2 oder Cl_2 vor. Indem sie sich dabei zwei Elektronen teilen, füllen sie beide ihre Valenzschale pro forma auf; dennoch bleiben sie ausgesprochen reaktionsfreudig.

Halogene bilden mit Metallen in der Regel ionische und mit Nichtmetallen

◀ Halogene sind Elemente mit sieben Elektronen in der äußersten Schale. Wegen dieser Gemeinsamkeit stehen sie im Periodensystem gemeinsam in der siebten Spalte (Gruppe). Fluor, Chlor, Brom und Iod kommen natürlich vor; Astat ist als instabiles radioaktives Element nur künstlich herstellbar. Viele Organohalogenverbindungen – links eine kleine Auswahl – werden sowohl in Lebewesen als auch in der chemischen Industrie produziert.

kovalente Verbindungen. Beispiele für Erstere sind die meisten Halogenide wie etwa Natriumchlorid, besser bekannt als Kochsalz; zu den Letzteren zählen vor allem die kohlenstoffhaltigen Organohalogenverbindungen.

Schwämme, Korallen und die meisten Arten von Seetang sind fest am Meeresboden verankert, sodass sie Räubern und Parasiten nicht entfliehen können. Da sie über keine anderen Mittel zur Verteidigung verfügen, setzen sie chemische Waffen gegen ihre Feinde ein – darunter auch Halogenkohlenwasserstoffe, die sie in großer Menge und Vielfalt erzeugen. Schwämme scheiden zum Beispiel verschiedene bromierte Dioxine aus, Verwandte der berüchtigten industriellen Schadstoffe gleichen Namens. Diese verhindern zusammen mit ihren Stoffwechselprodukten den Bewuchs mit Muscheln. Damit haben die Schwämme ein Problem gelöst, unter dem auch Schiffe, Landungsstege und andere vom Menschen geschaffene Gegenstände im Meer leiden.

Ein Seetang, den die Eingeborenen Hawaiis mit Vorliebe essen und Limukohu nennen, enthält mindestens hundert Organohalogenverbindungen – größtenteils mit einzigartigen chemischen Strukturen. Bromhaltige Substanzen aus dem Seetang, der in den Gewässern um die Südseeinsel wächst, verursachen bei Kontakt mit bloßer Haut außerdem juckende Stellen, die als Schwimmerkrätze *(swimmer's itch)* bekannt sind.

Nacktkiemer und Seehasen – beides gehäuselose Meeresschnecken – überleben als äußerlich ungeschützte Weichtiere ebenfalls nur dank chemischer Waffen. Eine Seehasenspezies sondert ein bitter schmeckendes bromhaltiges Stoffwechselprodukt ab, um Fressfeinden wie Haien den Appetit zu verderben. Manche Nacktkiemer sind allerdings nicht fähig oder vielleicht auch nur zu bequem dazu, ihr Chemiewaffenarsenal selbst zu synthetisieren; sie nehmen es stattdessen mit den Schwämmen und Algen auf, die sie verzehren. In diesem Fall hat die Anreicherung von Schadstoffen in der Nahrungskette einen positiven Effekt – zumindest für die Schnecken.

In anderen Fällen dagegen sind die Folgen eher problematisch. So wurden in Möwen, Albatrossen, Lunden, Seeadlern und anderen Vögeln, die sich aus dem Meer ernähren, halogenierte Bipyrrole entdeckt. Das war das erste Beispiel für die Akkumulation einer natürlichen Organohalogenverbindung am Ende der Nahrungskette. Die Primärquelle ist wahrscheinlich ein marines Bakterium. Eine verwandte Verbindung namens Q1 fand sich in einer Vielzahl von Meerestieren wie Robben und Delfinen sowie in der Milch von Frauen auf den Färöern, wo häufig Walspeck auf den Tisch kommt.

Die beiden natürlichen Substanzen ähneln in ihrer chemischen Struktur den PCBs von Menschenhand, die früher als Isoliermaterial in Transformatoren und Kondensatoren verwendet wurden. Und wie diese reichern sie sich in Fettgewebe an. Die schädlichen Eigenschaften von PCBs sind inzwischen gut bekannt; dagegen bleibt die Wirkung von Q1 und anderen natürlichen Halogenkohlenwasserstoffen auf die Gesundheit von Lebewesen am Ende der Nahrungskette erst noch zu untersuchen.



Gleich zwei natürliche Quellen für Methylhalogenide sind hier zu sehen: Rapspflanzen und Nadelbäume. Erstere setzen Methylbromid frei und erreichen dabei etwa 15 Prozent der anthropogenen Emission; Letztere stoßen erhebliche Mengen an Methylchlorid aus.

Passive Aggressivität

Auch wenn sie mit ihren Verwandten im Wasser nicht mithalten können, produzieren Pflanzen und Pilze an Land ebenfalls viele chlor- und bromhaltige Stoffe sowie einige Fluorverbindungen. Die einfachste Organobromverbindung, Methylbromid oder Brommethan, ist ein kommerzielles Desinfektionsmittel und Pestizid. Da es stark ozonzerstörend wirkt, sollte in den Industrieländern laut Montreal-Protokoll, einem 1987 geschlossenen internationalen Abkommen zum Schutz der Ozonschicht, Anfang 2005 ein generelles Verwendungsverbot für die Substanz in Kraft treten. Doch auf der Basis von Ausnahmegenehmigungen werden dieses Jahr voraussichtlich in den USA noch mehrere tausend, in der Europäischen Union einige hundert und in Deutschland neunzehn Tonnen eingesetzt.

Allerdings produzieren nicht nur wir Menschen Methylbromid. Auch Mitglieder der Brassicaceae-Familie, zu der Kohl, Brokkoli, weiße Rüben und Raps gehören, stellen die Verbindung her. Raps allein erzeugt weltweit 6600 Tonnen Methylbromid im Jahr, was 15 Prozent der industriell produzierten Menge entspricht.

Andere vertraute Pflanzen wie immergrüne Bäume und Kartoffeln synthetisieren dagegen Methylchlorid. Es ist dank seiner weit verbreiteten Herstellung in der Natur wie in der Industrie das häufigste chlorhaltige Molekül in der Atmosphäre überhaupt.

Aber das Pflanzenreich wartet noch mit vielen weiteren bemerkenswerten Organochlorverbindungen auf. Dazu gehören etwa die Wachstumshormone in Bohnen und Erbsen. Eine essbare japanische Lilie enthält gleich einen Cocktail von sieben chlorhaltigen Fungiziden, und der Penizillin-Schimmelpilz produziert 2,4-Dichlorphenol als Wachstumshormon. Diese Substanz wird auch in- ▷

Organohalogenverbindungen aus dem Meer

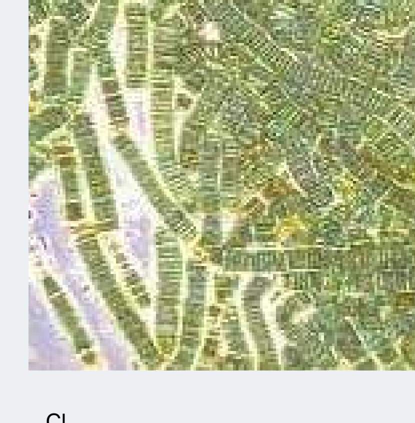
Die reichste Quelle für Organohalogenverbindungen sind marine Organismen. Der Schwamm *Dysidea dendyi* erzeugt bromierte Dioxine; hier ist sein naher Verwandter *Dysidea granulosa* gezeigt (oben rechts). Die fädigen Cyanobakterien (»Blaualgen«) der Gattung *Lyngbya* (unten rechts) synthetisieren Aplysiatoxin, das die Schwimmerkrätze verursacht. Der Seehase *Aplysia californica* (unten links) stößt eine Tinte aus, deren halogenierte Bestandteile – wie das Aplysiatoxin – aus seiner Algenkost stammen. Auch viele andere Meeresschneckenarten nutzen diese Nahrungsquelle zur Fabrikation ihrer »Chemiewaffen«. Die chlorierten Substanzen, die der leuchtend gefärbte Nacktkiemer *Chromodoris hamiltoni* (oben links) herstellt, sind dagegen aus eigener Fertigung.

BILL RUDMAN



FRANCIS SCHMITZ

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



ROLF SCHAUDER, MARK SCHNEEGURT UND WWW-CYANOSITE.BIO.PURDUE.EDU

2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin (2,3,7,8-TCDD) – ist ein hoch giftiger industrieller Schadstoff. Sehr ähnliche Verbindungen bilden sich aber auch auf natürlichem Weg. So produziert der Schwamm *Dysidea dendyi* Spongiadioxin A, und in den Torfsümpfen der kanadischen Provinz New Brunswick entsteht bei der Zersetzung von Pflanzenmaterial 1,3,6,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin (1,3,6,8-TCDD).

Spongiadioxin A — 1,3,6,8-TCDD — 2,3,7,8-TCDD

▷ dustriell hergestellt – als Vorstufe für verschiedene andere Verbindungen. Als Herbizid »2,4-D« war sie der Hauptbestandteil des berüchtigten Entlaubungsmittels *Agent Orange*, das die US-Armee im Vietnamkrieg einsetzte.

Auch Fluorkohlenwasserstoffe kommen in der Natur vor. Sie sind jedoch selten, weil Fluor nur in geringen Mengen in biologisch verwertbarer Form im Boden vorliegt. Die bekannteste Verbindung ist Fluoressigsäure. Sie findet sich in verschiedenen Pflanzen, die in Australien und im südlichen Afrika heimisch sind. Da die Substanz hoch giftig ist, hat sie schon so manches Stück Vieh getötet, welches das Pech hatte, die betreffenden Pflanzen zu fressen.

Früher war Fluoressigsäure ein weit verbreitetes Pestizid, das unter anderem als Rattengift diente. Es greift in den Krebszyklus ein, einen zentralen zellulären Prozess zur Verstoffwechslung von Kohlehydraten, und führt zu einer fatalen Erhöhung der Zitronensäure-Konzentration, was Krämpfe, Atemlähmung und einen Kreislaufkollaps auslöst.

Das *Agent Orange* der Zecke

Gliederfüßer und Wirbeltiere synthetisieren ebenfalls eine Anzahl von Organohalogenverbindungen, wenn auch nicht so viele wie Meerespflanzen und -tiere. So produzieren die Weibchen von mehr als einem Dutzend Zeckenarten die Verbindung 2,6-Dichlorphenol als Sexuallockstoff. Es ist ein enger Verwandter der schon erwähnten Vorstufe für *Agent Orange*.

Die Küchenschabe nutzt zwei weitere chlorhaltige Substanzen als Signal, sich zusammenzuscharen (Aggregationspheromon). Auch das chemisch sehr einfache Chloroform, das Mitte des 19. Jahrhunderts als Betäubungsmittel diente und heute ein gängiges industrielles Lösungsmittel ist, hat eine Vielzahl tierischer Quellen. Die wichtigsten Emittenten sind Termiten. Sie stoßen 15 Prozent des Chloroforms aus, das weltweit in die Atmosphäre gelangt – vielleicht als Abfallprodukt der Chlorverbindungen, die natürlicherweise im Holz vorkommen.

Der winzige Pfeilgiftfrosch *Epipedobates tricolor*, der in Ecuador lebt, sondert das chlorhaltige Epibatidin ab: eine Substanz mit höchst ungewöhnlicher Struktur. Sie wirkt als Schmerzmittel 500-mal so stark wie Morphium, weshalb die pharmazeutische Industrie syn-

▶ Vulkanische Gase, wie sie der Pu'u-O'o-Krater des Kilauea auf Hawaii (links) ausstößt, können CFC-11 enthalten – einen Ozonkiller, der früher als Kühlmittel diente. Bei Wald- und Graslandbränden – meist von Menschen gelegt – entstehen große Mengen Methylchlorid und -bromid, die auch zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beitragen.



RICHARD P. HOBLITT, USGS HAWAIIAN VOLCANO OBSERVATORY

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

thetische Analogverbindungen auf ihre Eignung als Analgetika untersucht. Der Frosch wehrt damit vermutlich Räuber ab, während die einheimischen Indianer ihre Pfeile mit dem Sekret vergiften.

Unsere eigene Spezies produziert das iodhaltige Schilddrüsenhormon Thyroxin, das den grundlegenden Stoffwechsel reguliert. Hundert Jahre lang hielt man es für die einzige vom menschlichen Körper hergestellte Organohalogenverbindung. Kürzlich jedoch stellte sich heraus, dass wir auch Bleichsäure (hypochlorige Säure) – Bestandteil vieler Toilettenreiniger – und Chlorgas produzieren!

Die weißen Blutkörperchen benutzen Chlorid und das Enzym Myeloperoxidase, um mikrobielle Krankheitserreger und vielleicht auch Tumorzellen abzutöten. Dabei entstehen chlorierte Proteine und Nucleinsäuren als Nebenprodukte. Dieser Chlorierungsprozess ist ein wesentliches Element der Immunabwehr. Menschen, denen die Myeloperoxidase fehlt, sind äußerst anfällig für bakterielle Infektionen, insbesondere Lungenentzündung.

Schadstoffe aus dem Erdinnern

Menschliche Zellen synthetisieren auch Organobromverbindungen, freilich nur wenige. Als Erstes wurde ein Bromester in der Hirnrückenmarksflüssigkeit gefunden. Er induziert die mit Träumen verbundene Rem-Schlafphase, die durch rasche Augenbewegungen *(rapid eye movements)* gekennzeichnet ist.

Die Häufigkeit der Halogene in Lebewesen weicht stark von der in der Erdkruste ab. Organismen favorisieren Chlor- und Bromverbindungen. In der Erde dagegen dominiert das Fluor. Vulkane stoßen alljährlich 11 Millionen Tonnen Fluor- und 3 Millionen Tonnen Chlorwasserstoff aus. Diese enormen Mengen zeigen, wie verbreitet die beiden Elemente im Erdinneren sind. Bei den dort herrschenden hohen Temperaturen und Drücken reagiert organisches Material wie Torf mit Chlorid- und Fluoridmineralien zu kohlenstoffhaltigen Halogenverbindungen. Auf mindestens drei Kontinenten – Asien, Europa, Nord- und Südamerika – blasen Vulkane solche natürlich gebildeten Organochlor- und Organofluorgase in die Luft. Teils sind diese mit anthropogenen Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKWs) identisch, die den Abbau des Ozons in der Stratosphäre katalysieren.

Auch Gestein enthält Organohalogenverbindungen, sei es als Gas in Hohlräumen oder als Bestandteil bestimmter Mineralien. Im Bergbau entweichen aus manchen Gesteinen beim Zertrümmern Methylchlorid, Dichlormethan, Chloroform, Kohlenstofftetrachlorid und andere Chlorverbindungen. Allein der Abbau von Kaliumsalzen setzt Tausende von Tonnen Chloroform im Jahr frei. Diverse natürliche Fluoritmineralien enthalten Tetrafluorethylen, die chemische Vorstufe zu Teflon. Ein dunkelvioletter Fluorit aus Bayern verströmt beim Zerstoßen unverkennbar den Geruch von Fluor, was ihm unter den ortsansässigen Bergleuten den Namen »Stinkspat« eintrug.

Halogene sind übrigens nicht auf die irdische Chemie beschränkt. Chlorwasserstoff und Fluorwasserstoff finden sich auch im interstellaren Raum, und in mindestens vier Meteoriten wurden chlorhaltige Substanzen nachgewiesen.

▶ ***Dichapetalum cymosum*** **oder Gifblaar, eine in Südafrika heimische Pflanze, gehört zu den wenigen Gewächsen in Afrika und Australien, die Fluoressigsäure produzieren. Diese Substanz greift in den biochemischen Krebszyklus ein – was sie für Vieh, das die Pflanze frisst, gefährlich macht, für Hersteller von Pestiziden aber wertvoll.**

Bedeutende Mengen von Organohalogenverbindungen entstehen beim Verbrennen von Biomasse. Die meisten Brände werden von Menschen gelegt, aber immerhin zehn Prozent gehen auf Blitze oder andere Naturereignisse zurück. Insgesamt gelangen auf diese Weise jährlich 900000 Tonnen Methylchlorid und 10000 bis 50000 Tonnen Methylbromid in die Luft. Rechnet man alle Methylchlorid-Emissionen zusammen, kommt man auf schätzungsweise 4 Millionen Tonnen pro Jahr. Dagegen nehmen sich die 10000 Tonnen aus der Industrie fast harmlos aus.

Biologischer Halogenkreislauf

Doch kehren wir zurück zur belebten Natur. Wie stellen Organismen Organohalogenverbindungen her? Viele Untersuchungen in jüngster Zeit sind dieser Frage nachgegangen. Inzwischen kennt man mehrere biogene Halogenzyklen. Als Ausgangsmaterial stehen Halogenidsalze in riesigen Mengen zur Verfügung. Die Weltmeere und die Erdkruste enthalten 27 beziehungsweise 45 Billiarden Tonnen Chlorid sowie 89 beziehungsweise 190 Billionen Tonnen Bromid.

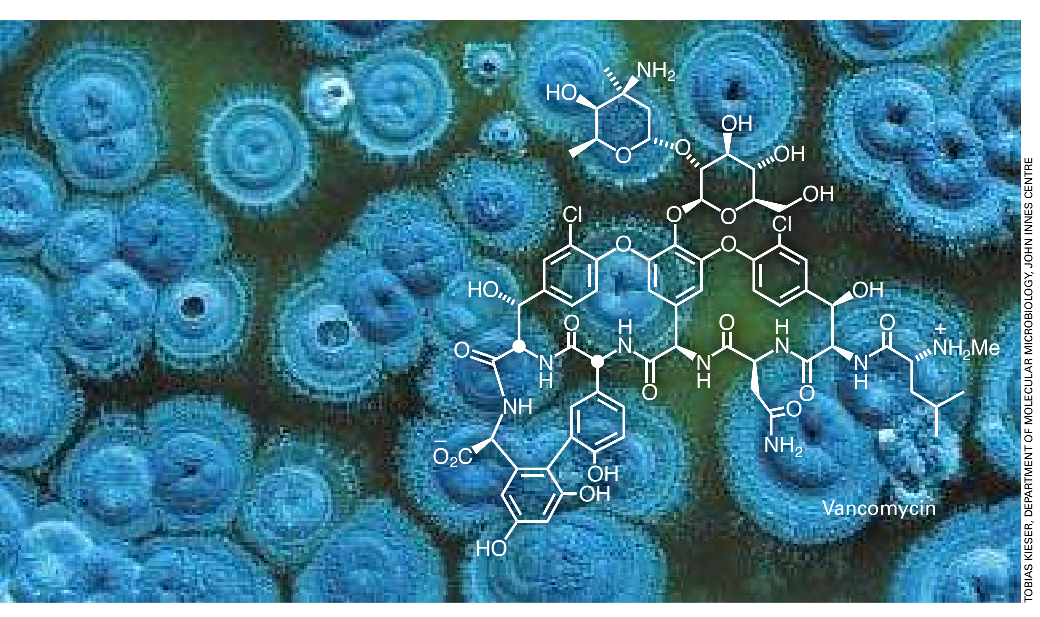
Mit Hilfe der beiden gängigen Enzyme Bromperoxidase und Chlorperoxidase oxidiert Wasserstoffperoxid, ein normales Stoffwechselprodukt, Bromid und ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



JAN VERKADE, S'HERTOGENBOSCH

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



TOBIAS KIESER, DEPARTMENT OF MOLECULAR MICROBIOLOGY, JOHN INNES CENTRE

◁ **Etliche Organohalogenverbindungen aus natürlichen Quellen sind wertvoll für die Medizin: Der Pfeilgiftfrosch *Epipedobates tricolor* (oben) sondert Epibatidin ab, das als Schmerzmittel 500-mal stärker wirkt als Morphin. Das Cryptophycin eines Cyanobakteriums aus der Gattung *Nostoc* (Mitte) ist ein potenter Tumorhemmer. Und von *Streptomyces* (heute *Amycolatopsis*) *orientalis*, einem Verwandten von *Streptomyces coelicolor* (unten), stammt das chlorhaltige Antibiotikum Vancomycin.**

▷ Chlorid zu Hypobromit und Hypochlorit, dem Salz der schon erwähnten hypochlorigen Säure. Von 94 Rotalgenspezies zeigen 71 Bromperoxidase-Aktivität; außerdem kommt das Enzym in einigen marinen Diatomeen (Kieselalgen) vor. Freies Chlor entsteht auch über dem Meer bei der Oxidation von Salzwassertröpfchen durch Ozon. Folgereaktionen mit organischen Stoffen können zu Organochlorverbindungen führen.

Die biologische Chlorierung ist Teil eines wichtigen Reaktionspfads beim Recycling von organischem Abfall. Jedes Jahr zersetzen sich schätzungsweise 63 Milliarden Tonnen totes Pflanzenmaterial zu Huminsäure, die in Gegenwart von Chlorperoxidase und Natriumchlorid chloriert wird. Die resultierende komplexe polymere Substanz wird dann in großem Umfang weiter abgebaut: zuerst zu Chlorphenolen und schließlich zu Chloressigsäure und Chloroform.

Chlorphenole können sich auch zu Dioxinen dimerisieren; dieser erstaunliche natürliche Prozess wurde ursprünglich im Boden der Torfsümpfe in der kanadischen Provinz New Brunswick und der Douglasienwälder in Schweden nachgewiesen; er läuft aber auch an profaneren Orten ab: in frischem Kompost, Abwässern und Kuhfladen.

Viel älter als der Mensch

Chlorierte Huminsäure ist mit Sicherheit kein Produkt, das nur unter den heutigen Umweltbedingungen entsteht. Chemiker fanden sie auch in 5200 Jahre alten Grundwasserreservoirs und in 35 000 Jahre altem organischem Material. Organochlorverbindungen ließen sich sogar in Lignitproben aus der Tertiärzeit vor 15 Millionen Jahren und in einem 300 Millionen Jahre alten Kohlestück

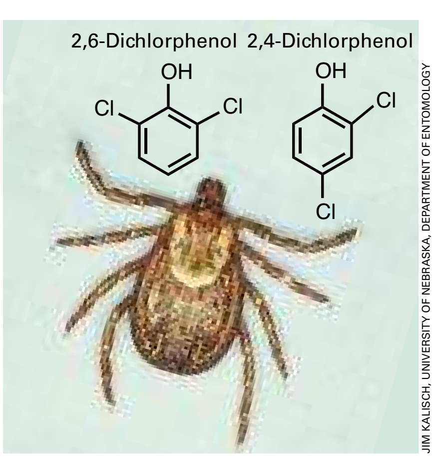
nachweisen. Cyanobakterien, die viele solche Substanzen synthetisieren, existieren schon seit mehr als 2 Milliarden Jahren. Demnach waren Organochlorverbindungen vermutlich seit dem Entstehen des Lebens auf der Erde präsent, und ganz gewiss gab es sie schon, lange bevor der Mensch auf der Bildfläche erschien.

Vor Jahrtausenden gewannen und nutzten unsere Vorfahren bereits halogenhaltige Biomoleküle. So extrahierten die Phönizier aus der Mittelmeerschnecke *Murex* den tyrischen Purpur, ein bromhaltiges Analogon zum blauen Indigo. Sie verdanken diesem Farbstoff, der auf Griechisch *phoinix* heißt, sogar ihren Namen. Hinweise auf die Purpurproduktion in der Stadt Tyros gibt es schon in Texten um 1600 vor Christus. Der seltene, brillante Farbstoff entwickelte sich zum Haupterzeugnis des phönizischen Handelsimperiums. Römer, Ägypter und Perser machten ihn zum Symbol des Königtums, und noch heute versinnbildlicht er die Kardinalswürde.

Als ähnlich wertvoll wie einst der Purpur könnten sich in Zukunft andere natürlich vorkommende organische Halogenverbindungen erweisen. Da viele von ihnen in Lebewesen wichtige Funktionen ausüben, sollten sie für die Medizin eine wahre Fundgrube sein. Bisher wurden nur wenige Schätze daraus geborgen.

Ein Beispiel ist das Antibiotikum Vancomycin – oft die Ultima Ratio bei der Abwehr von Bakterien mit Mehrfachresistenz. Zur Bekämpfung von Mückenlarven offeriert der Seetang das chlorierte Stoffwechselprodukt Telfairin. Es wirkt ebenso stark wie Lindan (Hexachlorcyclohexan), das wegen seiner vermuteten Toxizität in die Kritik geraten ist. Die aus Pilzen gewonnene Chlorverbindung Maracen bekämpft erfolgreich Mycobakterien, die Tuberkulose verursachen. Schließlich zeigen die chlorhaltigen Punaglandine aus einer Weichkoralle im Südpazifik starke Antitumoraktivität und könnten demnächst zur Krebstherapie genutzt werden.

Auch eine andere Organochlorverbindung hat sich als viel versprechendes Mittel gegen Krebs erwiesen: Cryptophycin aus Cyanobakterien der Gattung *Nostoc*. Nach vorläufigen Ergebnissen ist es viel wirksamer als die kommerziellen Tumorhemmer Taxol oder Vinblastin. Ein synthetisches Analogon wird gerade klinisch erprobt. Das Chloratom spielt darin die entscheidende Rolle: Entfernt man es, sinkt die Wirksamkeit auf ein Zehntel. Als aussichtsreiches Antikrebsmittel erscheint auch das chlorhaltige Spongistatin 9 aus einem Schwamm. Bei Tests verschiedener Cytostatica an sechzig Tumorzelllinien am National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) hat es sich als eine der wirksamsten Substanzen erwiesen. Andere neue Organohalogenverbindungen schließlich hemmen Viren, sogar den Aids-Erreger HIV.



Die Weibchen von 14 Zeckenarten – hier die amerikanische Hundezecke *(Dermacentor variabilis)* – nutzen die Substanz 2,6-Dichlorphenol (links) als Sexuallockstoff. Das isomere 2,4-Dichlorphenol ist ein Breitbandherbizid, aus dem das im Vietnamkrieg eingesetzte Entlaubungsmittel *Agent Orange* zur Hälfte bestand.

Noch kaum genutzte natürliche Schatztruhe

Auf der Suche nach neuartigen Medikamenten entdecken Naturstoffchemiker jedes Jahr durchschnittlich 100 bis 200 Organohalogenverbindungen – zum größten Teil im Meer. Tatsächlich wurde bisher nur ein kleiner Prozentsatz der rund 500 000 Spezies von Meerestieren, -pflanzen und -bakterien chemisch ausgewertet. Deshalb dürften noch tausende natürliche Organohalogenverbindungen im Verborgenen schlummern.

Ein gutes Beispiel sind die primitiven Moostierchen. Hier erzeugten von den wenigen Dutzend Spezies, die bisher analysiert wurden, die meisten ihre eigenen Organohalogenverbindungen. Insgesamt gibt es jedoch knapp 4000 Arten.

Wie wir gesehen haben, sind Halogene im Organismenreich genauso natürlich wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und die anderen Elemente des Lebens. Verbindungen mit ihnen stehen gleichberechtigt neben der Unzahl anderer Chemikalien, die in Flora und Fauna vorkommen. Wie alle Biomoleküle haben sich auch die Halogenverbindungen unter dem Druck der natürlichen Selektion für spezielle Aufgaben entwickelt – sei es die Übermittlung von Signalen oder die Abwehr von Feinden. Dadurch spielen sie eine wichtige Rolle für das Überleben des jeweiligen Organismus.

Die Entdeckung, dass einige anthropogene Halogenkohlenwasserstoffe auch natürlich produziert werden, erfordert eine breitere Bewertung von Umweltrisiken in dem Sinne, dass die Herkunft der Chemikalie keine Rolle spielen darf. Wenn die Summe aus natürlichen und anthropogenen Quellen ein unannehmbares Risiko darstellt, steht außer Frage, dass der menschliche Beitrag zu reduzieren ist – es sei denn, er erweist sich als marginal. Für solche Bewertungen aber müssen die Wissenschaftler die Anteile kennen, die jeweils aus der Industrie und der Natur stammen – eine Aufgabe, die eine genauere Kenntnis der biogeologischen Quellen und Senken dieser Stoffe erfordert. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gordon W. Gribble ist seit 1968 Professor für Chemie am Dartmouth College in Hanover (New Hampshire). Er befasst sich vor allem mit organischer Synthese und Naturstoffen. Seit 1990 interessiert er sich speziell für natürlich vorkommende Organohalogenverbindungen.

The diversity of naturally occurring organohalogen compounds. Von G. W. Gribble in: Chemosphere, Bd. 52, S. 289, 2003

Natural production of organohalogen compounds. Von G. W. Gribble (Hg.). Springer, New York 2003

Chlorine: The only green element – towards a wider acceptance of its role in natural cycles. Von N. Winterton in: Green Chemistry, Bd. 2, S. 173, 2000

Composite global emissions of reactive chlorine from anthropogenic and natural sources: Reactive chlorine emissions inventory. Von W. C. Keene et al. in: Journal of Geophysical Research, Bd. 104 (D7), S. 8429, 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

FLUGSICHERUNG

Freier Flug statt Zickzackkurs

In der Kontrolle des zivilen Luftverkehrs kündigt sich ein Paradigmenwechsel an.

Von Mark Fischetti und Edgar Lange

Über 8,5 Millionen Flugzeuge sind alljährlich zu den 2500 Flugplätzen Europas unterwegs, in Spitzenzeiten bis zu 1500 Maschinen gleichzeitig. Trotzdem ereignen sich gefährliche Situationen oder gar Unfälle selten. Denn ein auf Sicherheit ausgelegtes Flugkontrollsystem überwacht permanent den Luftraum.

Die Fluglotsen kommunizieren per Funk mit den Piloten und leiten sie vom Abflug bis zur Landung. Für jeden Teil der Strecke, die vorher in einem Flugplan festgelegt wurde, müssen Lotsen eine Freigabe erteilen. Mit Hilfe ihrer Radarschirme, auf denen sich jede Maschine abzeichnet, überprüfen sie zuvor, ob sich die Flugzeuge auch bei schlechter Sicht nicht in die Quere kommen können. In der Nähe von Flughäfen beträgt der Sicherheitsabstand in der Horizontalen mindestens fünf, anderenfalls acht Kilometer. Zudem müssen Maschinen in der Vertikalen mehr als 300 Meter voneinander entfernt sein. Freilich können die Controller, wie die Lotsen in der Fachsprache heißen, auch Abweichungen von den vereinbarten Flugrouten zulassen – etwa wenn der Luftraum um die Maschine im weiten Umkreis frei ist oder wenn schlechtes Wetter umflogen werden muss.

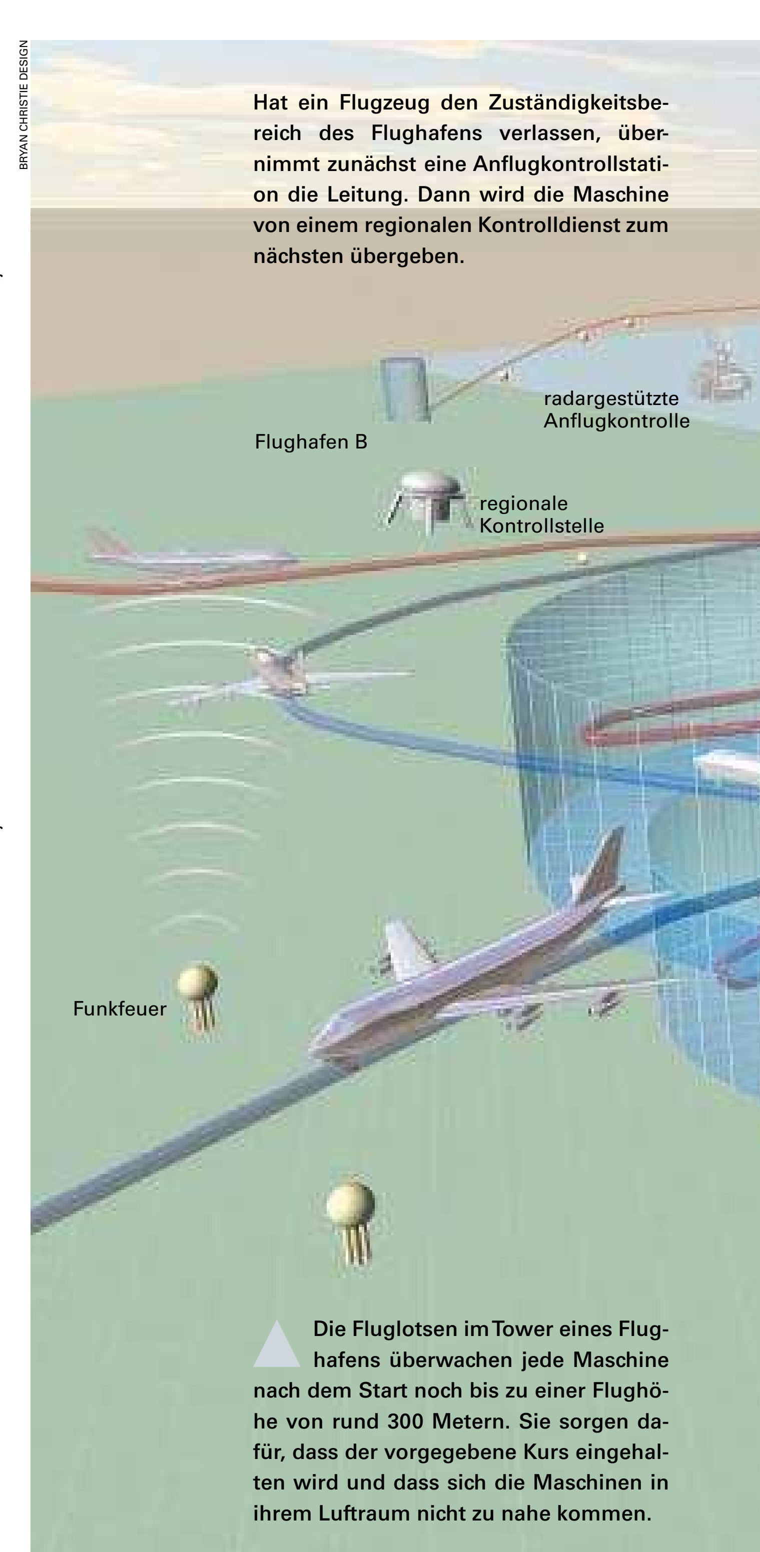
GPS statt Funkfeuer

Derzeit müssen die Piloten ihre Routen meist noch anhand so genannter Funkfeuer – Sendern am Boden – abfliegen. Diese Einrichtung hatte vor etwa fünfzig Jahren das Fliegen bei schlechter Sicht ermöglicht, zwingt die Maschinen aber in überlasteten Lufträumen auf einen umständlichen und Treibstoff verschwendenden Zickzackkurs. Die Technik der Zukunft heißt deshalb »Free Flight«: Jeder Pilot wählt seine Flugstrecke nach eigenem Ermessen, um auf möglichst direktem Weg schneller zu seinem Ziel zu kommen. Ein Computer berechnet die gewünschte, kürzeste Route noch vor dem Flug – den Piloten bleibt jedoch die Freiheit, auf kurzfristige Veränderungen etwa des Wetters zu reagieren. Dann können sie auch starke Rückenwinde nutzen, die in großen Höhen mit 200 Stundenkilometern Zeit und Sprit sparen helfen. Weiterer Vorteil: Den Luftfahrtgesellschaften wäre es dadurch freigestellt, ihre Flüge übergreifend zu optimieren. Im heutigen System ist es eher unüblich, dass etwa ein Pilot den Controller bittet, bei der Landung vorgelassen zu werden, weil sonst Passagiere ihren Anschluss verpassen würden. Mit Free Flight wäre das zumindest unter Flugzeugen derselben Gesellschaft kein Problem.

Möglich wird Free Flight durch das satellitengestützte GPS-Navigationssystem (Global Positioning System) und Transponder. Das sind Funkgeräte in den Flugzeugen, die untereinander Daten austauschen, sodass auch der Pilot jederzeit einen Überblick darüber hat, was im Luftraum um ihn herum geschieht.

Die amerikanische Luftfahrtbehörde ist mit ihren Planungen zu Free Flight bereits weit fortgeschritten und hat entsprechende Flugsicherungsrichtlinien festgelegt. Die Lotsen werden den knappen Luftraum künftig flexibler organisieren können und eine mehr überwachende Funktion haben, um in kritischen Fällen per Funk eingreifen zu können. Lästige Warteschleifen sollen dann entfallen. Vor allem aber: Die Sicherheitsabstände lassen sich reduzieren und so dem immer noch wachsenden Aufkommen im Luftverkehr Herr werden. ◁

Mark Fischetti ist Redakteur bei Scientific American und **Edgar Lange** freier Technikjournalist mit Schwerpunkt Luftfahrt.



Hat ein Flugzeug den Zuständigkeitsbereich des Flughafens verlassen, übernimmt zunächst eine Anflugkontrollstation die Leitung. Dann wird die Maschine von einem regionalen Kontrolldienst zum nächsten übergeben.

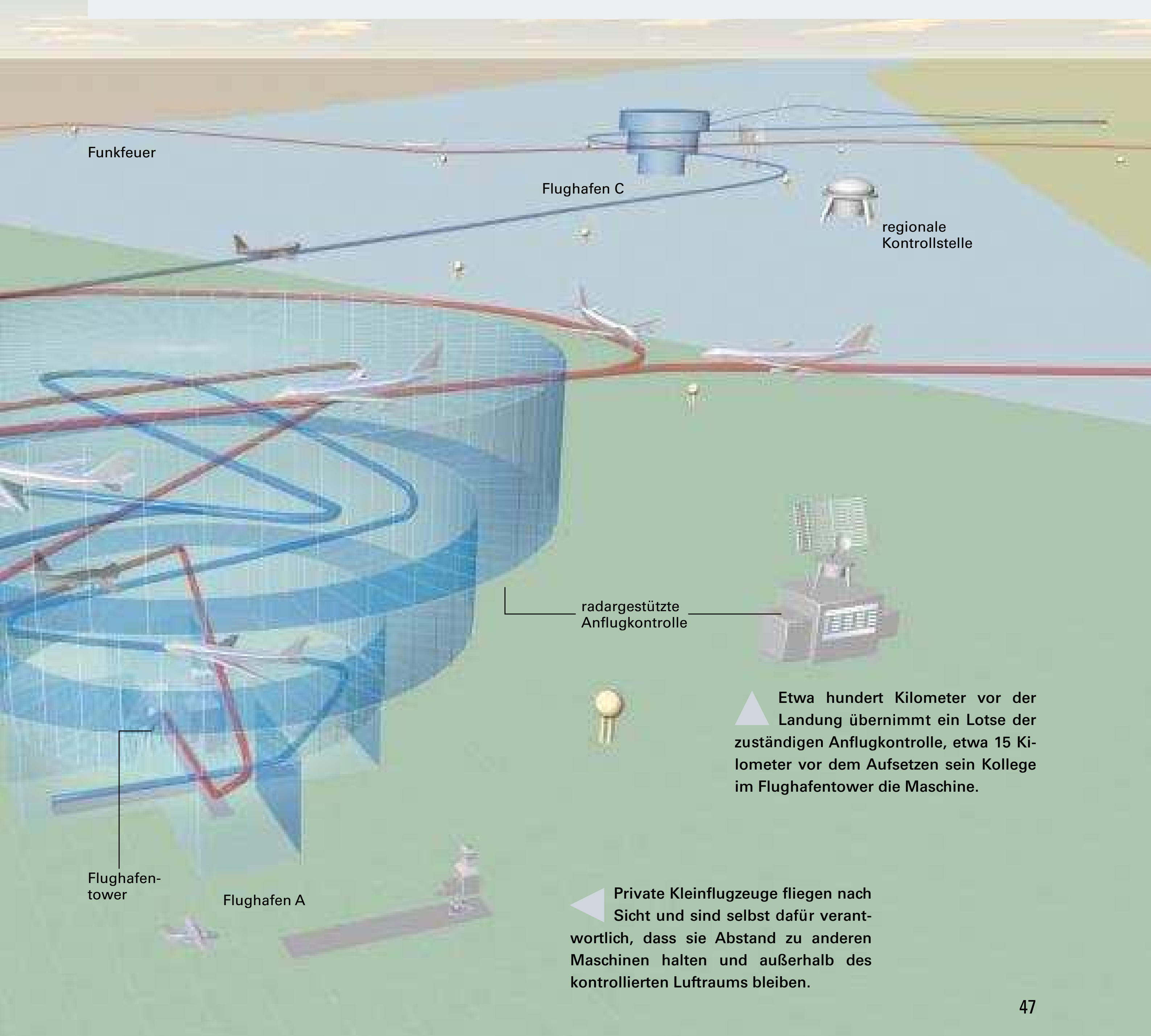
Die Fluglotsen im Tower eines Flughafens überwachen jede Maschine nach dem Start noch bis zu einer Flughöhe von rund 300 Metern. Sie sorgen dafür, dass der vorgegebene Kurs eingehalten wird und dass sich die Maschinen in ihrem Luftraum nicht zu nahe kommen.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Über dem Atlantik wird der Luftraum** großzügig eingeteilt. Denn über der riesigen Wasserfläche gibt es keine Radarüberwachung, eine permanente Kontrolle durch Fluglotsen ist also nicht möglich. Stattdessen melden die Piloten alle zehn Längengrade ihre Position über Kurzwellenfunk der Flugsicherungszentrale in Gander (Neufundland, Kanada) oder dem zwischen Shannon in Irland und Prestwick in Schottland aufgeteilten europäischen Pendant. Die Lotsen sorgen dann für einen Sicherheitsabstand von mindestens 180 Kilometern. Eine GPS-gestützte Flugführung soll ihn vermindern, im amerikanischen Luftraum wird dies bereits getestet.

▶ **1700 Fluglotsen arbeiten bei der deutschen Flugsicherung** (DFS). Zwar sitzen sie pro Woche nur 26 Stunden am Radarschirm, doch Arbeitsbelastung und Verantwortung sind extrem hoch, schließlich hängen von der Aufmerksamkeit der Lotsen unmittelbar Menschenleben ab. Schon nach einigen Dienstjahren klagen nicht wenige über Erschöpfungszustände. In der kommenden Dekade erreichen viele Fluglotsen das Rentenalter. Bewerber sind dringend gesucht, doch die ausdrücklich geforderte »Fähigkeit zu Mehrfacharbeiten in komplex dynamischen Situationen« schreckt ab. Immerhin reizt ein Einkommen von bis zu 100 000 Euro pro Jahr.

▶ **Neben den kommerziellen Verkehrsmaschinen** sind im deutschen Luftraum jede Woche Tausende von privaten Kleinflugzeugen unterwegs. Dieser Verkehr zwischen Flugplätzen mit Graspiste oder Vereinsflugplätzen im Sichtflug wird in der Regel nicht von der Flugsicherung abgewickelt, da er sich in geringerer Höhe abspielt.



Etwa hundert Kilometer vor der Landung übernimmt ein Lotse der zuständigen Anflugkontrolle, etwa 15 Kilometer vor dem Aufsetzen sein Kollege im Flughafentower die Maschine.

Private Kleinflugzeuge fliegen nach Sicht und sind selbst dafür verantwortlich, dass sie Abstand zu anderen Maschinen halten und außerhalb des kontrollierten Luftraums bleiben.

ANITA KUNZ

Muskelersatz aus dem Labor

Zukünftig soll ein Muskelimplantat das Infarktherz flicken und Folgeschäden abwenden. Das Ziel liegt in greifbarer Nähe.

Von Smadar Cohen und Jonathan Leor

Ein gebrochenes Herz kann heilen. Liebeskummer vergeht – die Schäden eines Herzinfarkts nicht. Im Gegenteil: Bei vielen Betroffenen verschlechtert sich die Herzleistung zusehends. Denn anders als Leber oder Haut kann sich der Herzmuskel nicht aus eigener Kraft regenerieren. Daher entsteht im Infarktareal eine bindegewebige, kontraktionsunfähige Narbenzone, die dem Herzen auf Dauer nur schadet.

Wegen der Infarktnarbe schlägt das Herz nicht mehr »rund«. Die übrige, noch gesunde Muskulatur ist nun chronisch überlastet. Das führt zu einem Teufelskreis: Noch mehr ihrer Zellen gehen zu Grunde. Mit der Zeit wird die beschädigte Stelle dünn und beult aus. In ein paar Monaten kann sich die Infarktzone auf das Doppelte vergrößern.

Heute überstehen dank des medizinischen Fortschritts immer mehr der Patienten einen akuten Herzinfarkt. Doch mindestens bei jedem Dritten baut sich die Herzkraft anschließend weiter ab. Oft bliebe als letzter Ausweg nur eine Herztransplantation. Schon wegen der begrenzten Zahl von Spenderorganen lässt sich der extrem komplizierte und teure Eingriff nur bei einem Bruchteil dieser Kranken vornehmen. Von den anderen aus dieser Gruppe überleben weniger als vierzig Prozent die ersten fünf Jahre nach dem Infarkt.

Die Medizin hat die Vision, die geschädigte Zone nach der Herzattacke mindestens zu stabilisieren, wenn nicht zu revitalisieren. Idealerweise würde man in das Infarktgebiet neues funktionales Muskelgewebe überpflanzen. Solche Zellverbände mitsamt den sie versorgenden Blutgefäßen im Labor zu züchten, ist allerdings ein besonders anspruchsvolles Ziel. Damit sich die neuen Muskelzellen koordiniert, synchron kontrahieren, müssen sie sich parallel nebeneinander ausrichten sowie untereinander bestimmte physische und neuronale Kontakte herstellen. Haut und Knorpel etwa lassen sich einfacher kultivieren, weil diese Gewebe wesentlich weniger komplex aufgebaut sind und kleinere Implantate keine interne Gefäßversorgung benötigen. Hingegen erfordern voluminösere Strukturen wie der Herzmuskel zur Ernährung und Sauerstoffversorgung ein feines Netz aus Blutkapillaren, welche das Gewebe durchziehen. Diese in einen größeren synthetischen Zellverband zu integrieren ist eine der wesentlichen Herausforderungen des Tissue Engineering, der Konstruktion synthetischer Gewebe.

Noch vor 15 Jahren erschien es vielen völlig abwegig, dass es jemals gelingen könnte, außerhalb des Körpers lebendes Gewebe zu konstruieren. Inzwischen sind einige Projekte schon recht weit fortgeschritten. Zum einen die Zellbiologie, zum anderen die Materialwissenschaften warten mit neuen Einblicken und Methoden auf, die sogar das ehrgeizige Ziel einer Herzmuskelregeneration und -überpflanzung erreichbar erscheinen lassen. In unserem Fall hat uns die Zusammenarbeit immerhin schon so weit gebracht, dass wir ein synthetisches Gerüst herstellen konnten, in dem Herzmuskelzellen und Blutgefäße sich zum Wachstum anregen lassen. Das Prinzip funktioniert sogar, wenn man diese dreidimensionale Matrix in die Infarktzone pflanzt.

Selbstheilung nicht möglich

Gewöhnlich entsteht ein Herzinfarkt (Myokardinfarkt), wenn plötzlich ein Blutgerinnsel eine der Arterien verstopft, die den Herzmuskel versorgen. In den meisten Fällen trifft es ein Koronargefäß der linken Herzkammer. Dieser Teil des Herzens erhält daraufhin kein frisches Blut mehr, also auch keinen Sauerstoff. Das halten die Muskelzellen nicht lange aus, und sie sterben ab. Die Größe der Infarktzone hängt davon ab, wie groß das Gebiet war, das die verstopfte Arterie versah.

Der versehrte Abschnitt kann sich nicht regenerieren, denn weil Herzmuskelzellen kaum teilungsfähig sind, gibt es an ihnen keinen Nachschub. Einige andere Gewebe verfügen zu dem Zweck über spezifische Stammzellen, doch im Herzen sind bisher schwer welche zu finden. Zumindest können sie den Defekt offenbar nicht aus eigener Kraft behe- ▷

◀ **Infarktgeschädigte Herzen zu reparieren, ist nicht mehr Utopie. Bioingenieure wollen bald neues Herzmuskelgewebe bereitstellen.**

ben. Stattdessen bauen sich dort mit der Zeit nicht-kontraktile Bindegewebszellen ein. Unter Umständen sterben sogar zusätzlich überlebende Herzmuskelzellen vom Rand des Infarktareals ab und vergrößern so die Narbenzone noch. Alles in allem wird die Herzwand an dieser Stelle grundlegend umgebaut. Sie wird dünner, dehnt sich aus und kann sogar reißen (siehe Kasten rechts).

In den letzten Jahren haben Forscher versucht, den Schaden eines Infarkts mit Stammzellen etwa aus dem Knochenmark oder aus Skelettmuskeln zu beheben, die sie ins Herz übertrugen. Man hoffte, diese würden in der neuen Umgebung entweder selbst zu Herzmuskelzellen heranreifen oder sonst möglicherweise doch vorhandene eigene Regenerationskräfte des Herzens stimulieren. Leider brachte das nicht den gewünschten Erfolg. Die Mehrzahl der überpflanzten Stammzellen überlebt die Prozedur nicht. Der Rest konzentriert sich eher an den Rändern des Infarktareals, stellt jedoch keine Kontakte zum benachbarten gesunden Gewebe her und gibt somit auch keine elektrischen Signale weiter.

Eigentlich verwundert das alles nicht. Schließlich fehlt den implantierten Zellen in der Narbenzone vor allem das physiologische Stützgerüst, das normalerweise beim Aufbau eines Gewebes mithilft, weil es sowohl Wachstumsfaktoren bietet als auch den Zellen Halt gibt. In einem gesunden Gewebe besteht diese extrazelluläre Matrix aus Faserproteinen wie Kollagen und aus Polysacchariden, komplexen Zuckermolekülen wie Heparansulfat.

Schon länger suchen Gewebeforscher für das Herz nach einem geeigneten Material, das diese Funktionen erfüllt. Die Zellen sollen sich darin ähnlich wie im natürlichen Umfeld ausbreiten und teilen können und sich zu einem räumlichen Gebilde organisieren, sodass sie sich aus dem Infarktareal nicht mehr zurückziehen. Später sollte sich die Kunstmatrix auflösen, weil die Zellen nun selbst ihr eigenes Haltegerüst produzieren. Ein entscheidender Aspekt wäre auch, dass die Kunstmatrix ein rasches Einwachsen von Blutgefäßen ermöglicht oder dies sogar vorantreibt. Eine ausreichende Sauerstoffversorgung und die Abfuhr von Stoffwechselendprodukten sind für das Überleben des neuen Muskelgewebes unverzichtbar.

Erste Voraussetzung: ein künstliches Zellgerüst

Ende der 1980er Jahre konnte eine von uns (Cohen) am Massachusetts Institute of Technology – MIT – in Cambridge bei Robert Langer arbeiten, einem der Pioniere des Tissue Engineering. Damals galt die Konstruktion lebender Gewebe vielerorts noch als unrealisierbar. Zudem hieß es, Chemieingenieure hätten in der Zellforschung nichts zu suchen. Das sollte sich bald ändern, je mehr die Biologen darüber herausfanden, wie Zellen mit verschiedensten Oberflächen interagieren, und die Chemiker lernten, völlig neuartige Polymere zu synthetisieren. Die Forscher haben nun schon mit einer Vielzahl artifizieller und natürlicher Komponenten experimentiert, immer mit dem Ziel, ein Gerüstmaterial für neue Gewebe zu finden.

Zunächst gehörten biologisch abbaubare Polyester wie Polylactide und Polyglykolide beziehungsweise Kopolymere aus beiden Grundstoffen zu den favorisierten synthetischen Materialien. Vom menschlichen Körper werden diese Substanzen im Allgemeinen zwar gut vertragen, doch sie haben einige Nachteile. Da sie meist wasserabweisend sind, heften sich lebende Zellen schlecht an ihre Oberflächen an. Außerdem werden Matrizes aus diesen Materialien nicht kontinuierlich abgebaut, sondern neigen zum Zerbröseln. Auch können saure Nebenprodukte ihres Zerfalls lokale Entzündungsreaktionen hervorrufen und dabei die implantierten Zellen noch schädigen.

Günstigere Eigenschaften in dieser Hinsicht zeigen synthetische wasserhaltige Gele. In ihrer räumlichen Struktur ähneln sie der natürlichen extrazellulären Matrix. Doch auch den Hydrogelen fehlen einige funktionell wichtige chemische Eigenschaften natürlicher Matrixproteine. Daher wurde auch die Eignung von Kollagen, Fibronectin und anderen extrazellulären Faserproteinen zum Aufbau synthetischer Gewebegerüste geprüft. Diese Proteine enthalten Aminosäuresequenzen, an denen sich lebende Zellen anheften. Leider sind sie jedoch mechanisch nicht belastbar genug, um größere Zellverbände zu stützen. Zudem wird besonders Kollagen von körpereigenen Enzymen rasch abgebaut. Je nach Herkunft können Fremdproteine außerdem allergische Reaktionen auslösen, die gerade für Patienten mit Herzinsuffizienz gefährlich und belastend sind.

Aus diesen Gründen entschieden wir uns, eine Zellmatrix aus proteinfreiem Material zu entwickeln. Wir verwenden Alginate, aus Algen gewonnene natürliche Polysaccharide. Alginate sind biokompatibel, provozieren folglich im menschlichen Körper keine Immunreaktion. Löst man bestimmte Sorten in Wasser und gibt Kalziumionen zu, vernetzen sich die Polysaccharide und es entsteht ein Hydrogel mit einem Wassergehalt von etwa 98 Prozent. In seiner gelatineartigen Konsistenz und Elastizität ähnelt es der natürlichen extrazellulären Matrix.

Wie lässt sich dieses Hydrogel manipulieren, damit es als Gerüstsubstanz für ein funktionales Gewebe aus Herzmuskelzellen nützt? Zum einen mussten wir ihm eine geeignete Gestalt und innere Struktur verleihen, zum anderen seine mechanische Stärke erhöhen, denn die Form muss der Belastung durch wachsende Zellverbände standhalten. Dazu probierten wir verschiedene Herstellungswege aus und fanden schließlich eine neuartige Methode, das Hydrogel zu verfestigen.

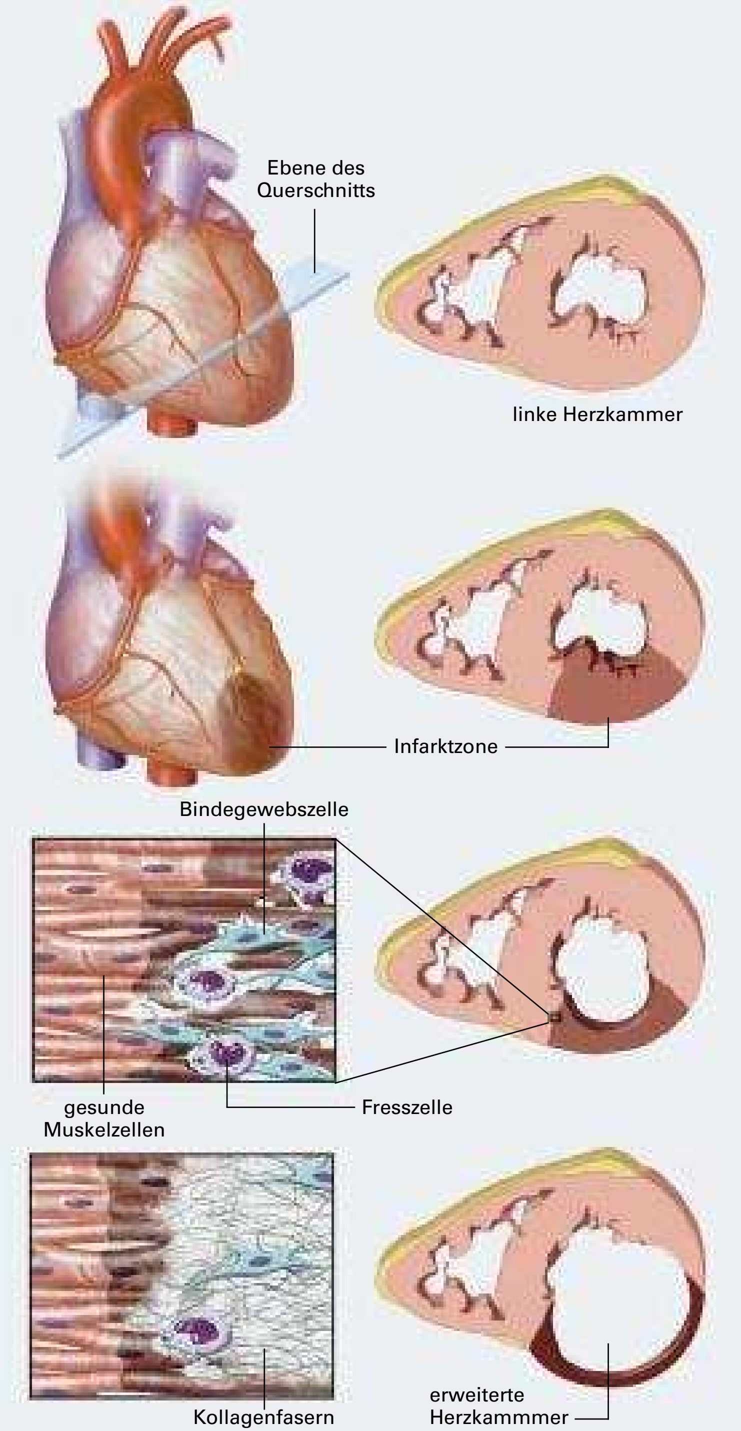
Im Grunde beruht das Verfahren auf einfachen physikalischen Prinzipien. Wenn man die Alginatlösung in eine winzige Form gießt und dann einfriert, bilden sich Eiskristalle in den Poren des Gebildes, also in den Zwischenräumen zwischen den vielen feinen Wänden aus

IN KÜRZE

- Oft entwickelt sich nach einem Herzinfarkt schließlich eine **Herzinsuffizienz.** Denn die Infarktzone vermag sich von allein nicht zu regenerieren, und der Schaden kann sich sogar vergrößern. Die Veränderungen belasten das kranke Herz übermäßig.
- **Gut durchblutete Gewebeimplantate** könnten nachträgliche Zerstörungen verhindern. Materialwissenschaftler und Zellbiologen entwickeln zusammen geeignete Verfahren für ein solches Tissue Engineering. Es gilt, ein künstliches Gerüst bereitzustellen, in dem sich neue Muskelzellen ausdifferenzieren und organisieren und in dem neue Blutgefäße wachsen.

Warum manches Infarktherz am Ende versagt

Vielen, die einen Herzinfarkt überleben, droht später eine Herzmuskelschwäche. Die Insuffizienz entsteht langsam wegen der schleichenden Umgestaltung des Organs.



gesundes Herz
Die linke Herzkammer pumpt sauerstoffreiches Blut in den Körper. Ihre kräftige Wand bilden besondere Muskelfasern, die Herzmuskelzellen.

akuter Infarkt
Wird ein Blutgefäß, das den Herzmuskel versorgt, plötzlich durch ein Gerinnsel verschlossen, sterben die Muskelzellen in dessen Versorgungsbereich an Sauerstoffmangel.

Vernarbung
Binnen Stunden bis Tagen beginnen Enzyme die extrazelluläre Matrix abzubauen, und Fresszellen räumen die toten Muskelzellen ab. An deren Stelle treten Bindegewebszellen. Die Herzwand wird dünn und starr. Indem im Randbereich weitere Muskelzellen absterben, kann sich das Narbenareal in ein paar Monaten auf das Doppelte ausdehnen.

Umgestaltung
Die starre Narbenzone stört die koordinierte Kontraktion des Herzens. Weil die gesunde Muskulatur mehr leisten muss, werden diese Bereiche unter Umständen zunächst dicker. Durch die Überlastung gehen dann aber weitere Zellen zu Grunde, die Herzkammer erweitert sich und die Wand wird immer dünner.

Alginat. Das Eis kann man anschließend durch Gefriertrocknung entziehen. Zurück bleibt eine schwammartige Struktur von gewünschter Gestalt, deren Poren der Form der Eiskristalle entsprechen. Wie wir zeigen konnten, sind für die Porenform die je nach Methode unterschiedlichen Temperaturgradienten entscheidend, die während des Abkühlens auftreten. Wir probierten, neben diversen Gussformen, drei verschiedene Gefrierverfahren aus und konnten so Dichte, Größe, Länge und Ausrichtung der Poren sowie den Grad ihrer Vernetzung untereinander steuern (siehe Kasten auf S. 52).

Wichtig ist besonders, dass die Alginatwände genügend viele – und genügend große – Löcher aufweisen. Diese Lücken haben mehrere Zwecke. Sie sind nötig, damit sich auf die Matrix ausgebrachte Zellen in dem Gerüst überall gut und rasch verteilen können. Man braucht die Löcher auch während der ▷

Gerüst für Herzmuskelgewebe

Um sich zu einem funktionalen Gewebe zu organisieren, benötigen Herzmuskelzellen eine Matrix für Halt und Orientierung. Das Gerüst sollte voller offener Poren – mit mindestens 200 Mikrometer Durchmesser – sein, die Zellkontakte ermöglichen und Blutkapillaren Raum geben.

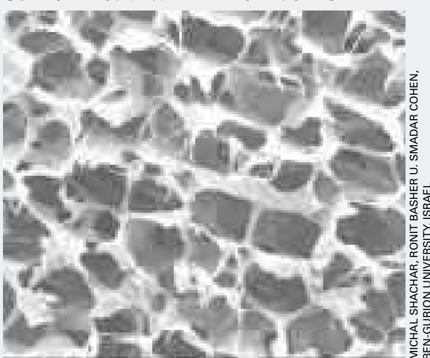
Als günstiges Matrixmaterial erweisen sich Alginate aus Algen, die in Wasser gelöst ein Gel bilden. Mit verschiedenen Gefriertechniken können wir die Porenbildung beeinflussen und feste Gerüste gewinnen (oben links). Beim Einfrieren bildet das Wasser Eiskristalle, deren Aussehen vom Ablauf der Prozedur abhängt (siehe unten). Wenn wir das Eis dann sublimieren, sozusagen »trocken verdampfen«, bleibt nur ein porenreiches Alginatgerüst zurück (oben rechts).

Gerüstformen aus Alginat



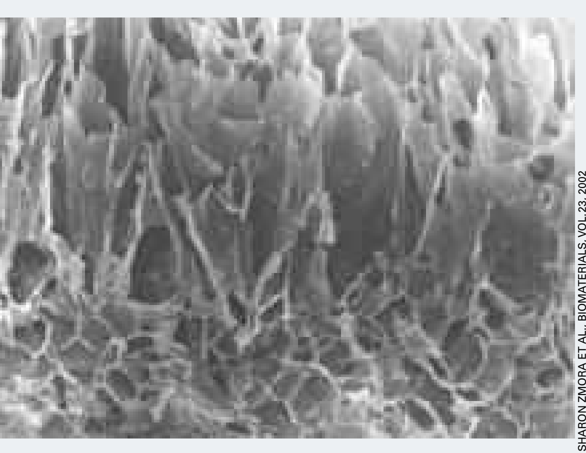
LILIA SHAPIRO U. SMADAR COHEN, BEN-GURION UNIVERSITY

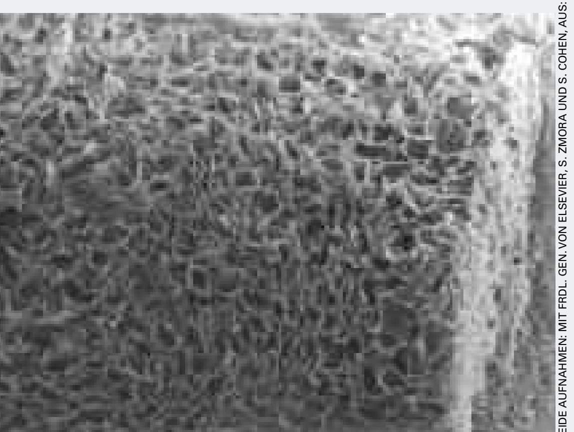
Schwammstruktur im Innern der Form



MICHAL SHACHAR, RONIT BASHER U. SMADAR COHEN, BEN-GURION UNIVERSITY, ISRAEL

Verschiedene Gefriertechniken

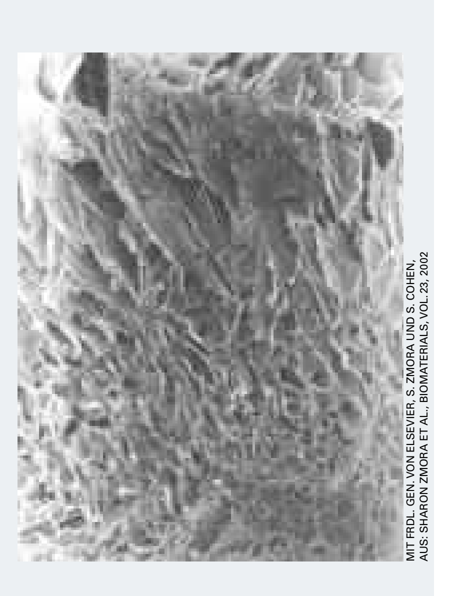




BEIDE AUFNAHMEN: MIT FRDL. GEN. VON ELSEVIER, S. ZMORA UND S. COHEN, AUS: SHARON ZMORA ET AL., BIOMATERIALS, VOL. 23, 2002

Ölbad von minus 35 °C
Am schnellsten gefriert der Boden der Probe. Dort entstehen dicht gepackte, feine Poren, die zueinander Verbindung haben. Darüber bilden sich dann größere, längliche Poren. Ihre Ausrichtung folgt der Ausbreitungsrichtung der Kältefront (links).

flüssiger Stickstoff, minus 196 °C
Hierbei entsteht ein ähnliches Porenbild wie im Ölbad. Die komplexe Form der Poren im oberen Abschnitt geht vermutlich darauf zurück, dass sich flüssiger Stickstoff leicht verflüchtigt und Kältefronten nun in verschiedene Richtungen ziehen (rechts).



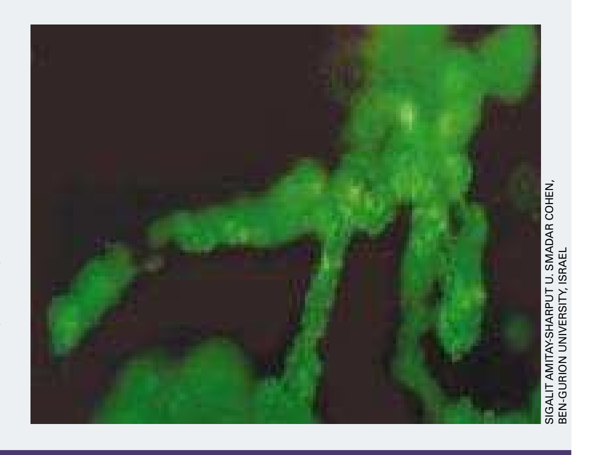
MIT FRDL. GEN. VON ELSEVIER, S. ZMORA UND S. COHEN, AUS: SHARON ZMORA ET AL., BIOMATERIALS, VOL. 23, 2002

Gefrierschrank bei minus 20 °C
Die Temperatur der Alginatlösung fällt zunächst auf minus 10 °C und steigt dann plötzlich wieder auf minus 2 °C. Erst danach sinkt sie langsam auf minus 20°C ab. Vermutlich kommt der plötzliche Temperatursprung zu Stande, weil das gesamte Wasser gleichzeitig kristallisiert und dabei Wärme abgibt. Den einheitlichen Prozess lassen auch die gleichartigen offenen Poren erkennen (links).



Porenstruktur

Form und Verbindungen der Poren bestimmen maßgeblich, ob ein funktionales Gewebe entsteht. Längliche Poren begünstigen zum Beispiel die Blutgefäßbildung. In einer in flüssigem Stickstoff hergestellten, von kanalartigen Poren durchzogenen Matrix arrangierten sich fluoreszenzmarkierte Endothelzellen (grün) innerhalb von zwei Wochen zu Strukturen, die an Blutkapillaren erinnern (rechts).



SIGALIT AMITAY-SHARPUT U. SMADAR COHEN, BEN-GURION UNIVERSITY, ISRAEL



▷ Anzuchtphase im Labor, um selbst noch den innersten Zellen zunächst ungehindert Nährstoffe zuzuleiten und Stoffwechselendprodukte abzuführen – eine Aufgabe, die später feine Adern übernehmen. Wenn das Transplantat dann ins Herz eingepflanzt ist, entscheidet wesentlich auch das Porenangebot, wie dicht Blutgefäße das neue Muskelstück durchwachsen. Nicht zuletzt hält der so behandelte Alginatschaum einen erheblichen Druck aus, selbst wenn die Poren und Lücken mehr als 95 Prozent des Volumens ausmachen.

Zweite Voraussetzung: Anzucht in der Kunstmatrix

Diese Matrix erfüllte die Vorbedingungen. Sie ließ sich in die gewünschte Form und Struktur bringen, war nicht immunogen und nicht toxisch, außerdem genügend dauerhaft und wurde im Körper doch in einem passablen Zeitraum abgebaut. Nun wurde es spannend: Würden Zellen dieses künstliche Gerüst an Stelle einer natürlichen extrazellulären Matrix akzeptieren, noch dazu in einer Infarktzone mit ihren Verwüstungen?

Dazu führten wir zunächst in Laborgefäßen Vorversuche durch. Wir verwendeten Herzmuskelzellen von Mäuseembryonen, bei denen diese Zellen noch teilungsfähig sind. Nachdem wir sie in einer Nährlösung aufgeschwemmt hatten, übertrugen wir sie auf kleine runde Scheibchen aus unserem Gerüstmaterial von sechs Millimeter Durchmesser und einem Millimeter Dicke. Mit vorsichtigem Zentrifugieren halfen wir nach, dass die Zellen sich rasch und gleichmäßig in dem Konstrukt verteilten. Das erreichten wir in nicht einmal dreißig Minuten. Für das Überleben der Zellen, die auf Sauerstoffmangel hochempfindlich reagieren, sind schnelle Abläufe entscheidend. Dank ihrer homogenen Verteilung in dem Gerüst erzielten wir trotzdem eine ähnliche Zelldichte wie im gesunden Herzmuskel – hochgerechnet 10^8 Zellen pro Kubikzentimeter.

Die mit Herzzellen beschickten Alginatgerüste kultivierten wir einige Tage in einem Bioreaktor – einem speziellen Inkubator, der ideale Wachstumsbedingungen bereitstellt, wie eine optimale Temperatur und eine hohe Luftfeuchtigkeit, und in dem ständig ein nährstoffreiches Medium die Probe durchströmt. Im Weiteren verfolgten wir genau die Stoffwechselprozesse der Zellen. Bereits nach 48 Stunden entdeckten wir Zellen, die sich rhythmisch kontrahierten. Nach sieben Tagen war es Zeit für den nächsten Schritt: die Implantation der Proben in ein lebendes Herz.

Das geschah bei erwachsenen Ratten, denen man sieben Tage vorher an der linken Herzkammer einen Infarkt gesetzt hatte. Als wir den narkotisierten Tieren den Brustkorb öffneten, konnten wir die Stelle gut erkennen. Der vernarbte Bezirk fiel auf, weil er blasser war als die Umgebung und sich nicht kontrahierte. Genau hierhin verpflanzten wir unsere Konstrukte.

Nun hieß es warten. Zwei Monate später legten wir die Herzen erneut frei – und staunten: Zahlreiche Blutgefäße waren aus dem gesunden Teil des Herzens in das Implantat eingewachsen (siehe Bild unten). Die Kunstprodukte hatten sich tatsächlich in das Narbengewebe integriert. Das Alginatgerüst begann sich bereits aufzulösen und einer natürlichen extrazellulären Matrix Platz zu machen. Embryonale Herzmuskelzellen hatten sich zu reifen Muskelfasern entwickelt. Manche waren sogar parallel angeordnet, wie es im gesunden Herzen typisch ist. Zwischen den Fasern bestanden sowohl mechanische Verbindungen als auch elektrische Synapsen, Strukturen für die ▷



MIT FRDL. GEN. AUS: JONATHAN LEOR ET AL., CIRCULATION, VOL. 102, NO. 19, 2000; AHA / LWW

Eine zellbesetzte Matrix hat sich zwei Monate nach Einpflanzung in den Herzmuskel einer Ratte in das Gewebe der Infarktzone integriert. Aus der Umgebung sind zahlreiche Blutgefäße eingewachsen. Die Infarktzone ist nicht größer geworden.

▷ Übermittlung des Kontraktionsbefehls. Vor der Implantation hatten wir die Herzfunktion der Tiere mittels Echokardiografie, also mit Ultraschall, gemessen. Zu dem Zeitpunkt arbeiteten die Herzen ähnlich gut – oder schlecht – wie die einer Kontrollgruppe von Ratten, denen man ebenfalls einen Infarkt verpasst hatte, die aber nur scheinoperiert werden sollten, also kein Implantat erhalten würden. Erneute Ultraschallmessungen zwei Monate nach Überpflanzung der angezüchteten Zellen zeigten jedoch deutliche Unterschiede.

Erfolg: Muskelschwund verhindert

Bei den Tieren der Kontrollgruppe bot sich das typische Bild einer beginnenden Herzinsuffizienz: eine beträchtlich erweiterte linke Herzkammer und eine im Vergleich zum Zustand zwei Monate vorher deutlich verminderte Pumpleistung. Dagegen ging es sämtlichen Ratten der Versuchsgruppe nicht schlechter als wenige Tage nach dem Infarkt. Bei ihnen hatten sich Größe und Wandstärke der linken Herzkammer nicht verändert. Auch die Herzfunktion war bei allen im Großen und Ganzen gleich geblieben.

Das erste gesetzte Ziel hatten wir somit erreicht. Wie wir nun wussten, kann es gelingen, Infarktherzen mit einem künstlichen Implantat vor weiteren Folgeschäden zu bewahren und so eine Herzinsuffizienz abzuwehren. Wesentliche Fragen bleiben dennoch zu klären. So wissen wir noch nicht, auf welche Weise das transplantierte Gewebe den Herzmuskel in unseren Versuchen überhaupt schützte. Schließlich trugen die neuen Zellen zu dessen Pumpleistung nichts bei. Offenbar half es schon, wenn das Implantat nur verhinderte, dass sich das Narbenareal weiter ausbreitete, und wenn es mitwirkte, dass die Herzwand an der verletzten Stelle dick genug blieb.

Wir denken, besonders auch die neuen Blutgefäße spielten eine Rolle, um den fatalen Umbau der Herzwand abzufangen. Interessanterweise wuchsen neue Adern auch in zellfreien Implantaten, wenn auch in kleinerer Anzahl und Größe als in den mit Muskelzellen bestückten Gerüsten.

Einfach indem sie einwachsenden Adern Halt gibt, könnte die Kunstmatrix das Einwachsen neuer Blutgefäße in die Infarktzone begünstigen. Wir vermuten aber auch, dass das Alginat körpereigene Stammzellen dazu bringt, bei der Gefäßregeneration mitzuwirken. In der chemischen Struktur ähnelt diese Gerüstsubstanz nämlich ausgesprochen Heparansulfat, einem wichtigen Polysaccharid der natürlichen extrazellulären Matrix. Unsere These haben wir kürzlich geprüft, indem wir schlicht Alginathydrogele direkt in die Infarktzonen von Rattenherzen injizierten. Tatsächlich behielt die Herzkammer sogar mit dem amorphen Gel ihre Form und Funktion. Offenbar ersetzte die Substanz die natürliche extrazelluläre Matrix und regte deswegen eine Gefäßneubildung an.

Um Menschen Herzgewebe zu transplantieren, besteht die Hürde, dafür geeignete Zellen zu finden. Wie viele andere Kollegen forschen auch wir nach brauchbaren Quellen für einen Ersatz. Reife Herzmuskelzellen des Patienten kommen nicht in Frage, weil sie sich

Verschiedene Ansätze mit gleichem Ziel

Forscher erproben verschiedene Methoden, um einen geschädigten Herzmuskel zu reparieren. Teils sind die Ansätze verwandt. Alle Erfolge und Fehlschläge bringen uns dem gemeinsamen Ziel näher: zerstörtes Herzgewebe zu ersetzen.

	Technik	Vorteile	Nachteile
	Zellinjektion Stammzellen oder Muskelvorläuferzellen werden via Herzkatheter oder direkte Injektion in das Infarktareal eingebracht	▸ Verabreichung einfach ▸ injizierte Zellen können Bildung extrazellulärer Matrix und Gefäßbildung anregen	▸ wenige Zellen überleben ▸ es werden keine neuen funktionstüchtigen Muskelfasern gebildet
	Gewebekultur Herzmuskelzellen werden in dünnen Schichten kultiviert, die Schichten übereinander gestapelt und chirurgisch implantiert	▸ Anzucht im Labor recht einfach ▸ stabileres Implantat als bei Injektion von Einzelzellen	▸ weil Blutgefäße fehlen, nur kleine, dünne Teile implantierbar ▸ extrem fragil
	poröse Matrix Zellen werden in einem dreidimensionalen Gerüst aus natürlichen oder synthetischen Polymeren ausgesät und in einem Bioreaktor kultiviert, das Konstrukt dann chirurgisch implantiert	▸ Gerüst unterstützt Organisation der Zellen zu gewebeähnlichem Verband ▸ Matrixmaterial fördert Gefäßneubildung	▸ problematisch bleibt das Intervall zwischen Implantation und Gefäßversorgung
	Gewebemontage eine Art dreidimensionaler Drucker montiert Formen aus Hydrogelpartikeln mit darin aufgeschwemmten Zellen; dann Kultur der Konstrukte und chirurgische Implantation	▸ räumliche Verteilung verschiedener Zelltypen im Implantat exakt programmierbar ▸ Zellen können sich im Hydrogel frei bewegen und organisieren	▸ Forschungsansatz steht noch am Anfang; noch keine Daten, ob solche Implantate im Körper funktionieren
	injizierbare Matrix Polymerhydrogele mit oder ohne Zellen werden via Herzkatheter oder direkte Injektion in das Infarktareal eingebracht	▸ Verabreichung einfach ▸ Hydrogele könnten als vorübergehender Ersatz der extrazellulären Matrix die Regeneration fördern	▸ Kontrolle der Gewebebildung begrenzt

VON OBEN NACH UNTEN, 1: N. DIB, ARIZONA HEART INST. UND J. DINSMORE, GENVEC INC.; 2: AUS: T. SHIMIZU ET AL., CIRCULATION RESEARCH, VOL. 90, NO. 3, PAGE E40, 2002; 3: M. SHACHAR, R. BASHER, S. COHEN, BEN-GURION UNIV.; 4: B. TEFFT, M. FRDL. GEN. VON T. BOLAND, CLEMSON UNIV.; 5: K. STAUB, M. FRDL. GEN. VON K. J. L. BURG, CLEMSON UNIV.



ANAT PERETS U. SMADAR COHEN, BEN-GURION UNIVERSITY, ISRAEL

Drei Mikrometer große Mikrosphären, die Wachstumsfaktoren für Blutgefäße freisetzen, werden gleichmäßig verteilt in die Matrix eingebaut. Man kann sie der Alginatlösung vor der Gefriertrocknung zugeben.

nicht mehr teilen. Im Prinzip könnte man Spenderzellen verwenden, insbesondere embryonale Stammzellen oder auch Stammzellen aus dem Knochenmark oder aus Nabelschnurblut, die man veranlassen müsste, sich zu Herzmuskelzellen auszudifferenzieren. Fremde Zellen würden allerdings vom Immunsystem bekämpft; der Patient müsste dann Medikamente erhalten, die eine Abstoßung unterdrücken. Besser wäre, man könnte patienteneigene Stammzellen oder andere noch nicht ausdifferenzierte Zellen gewinnen, sei es aus dem Knochenmark, dem Muskel- oder dem Fettgewebe – beziehungsweise man würde Stammzellen durch therapeutisches Klonen von Zellen des Patienten erzeugen. Noch geben wir auch die Hoffnung nicht auf, Herzstammzellen zu finden.

Wie sieht die zukünftige Forschung aus? Vor allem – wann wird es so weit sein, Implantationen an menschlichen Infarktherzen zu erproben? Die bisherigen Tierversuche ermutigen. Wir glauben, dass wir wahrscheinlich in drei Jahren soweit sind, zellfreie Alginatimplantate am Menschen zu erproben. Mittlerweile haben sie sich nicht nur an Ratten, sondern auch an Schweinen bewährt – ein Zeichen, dass auch bei größeren Tieren reine Alginatgerüste anscheinend schon den bedenklichen Um- und Abbau der geschädigten Herzwand zu verhüten vermögen. Am günstigsten wäre es, man würde so gleich den Anfängen einer Herzinsuffizienz wehren, möglichst bevor das Organ nach dem Infarkt noch weiteren Schaden nimmt.

Zucht von Herzgewebe im Organ selbst?

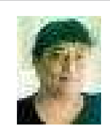
Auch die Versuche mit Zellimplantaten werden fortschreiten. Vielleicht können die neuen Zellen besser überleben, wenn man sie erst in das Gerüst überpflanzt, nachdem dieses schon einige Zeit im Körper war und bereits von Adern durchwachsen ist. Entsprechende Studien an Ratten verliefen viel versprechend. Überdies konnten wir die Gefäßbildung beträchtlich durch Hinzugabe von Wachstumsfaktoren steigern, die in das Gerüst integrierte Mikrokapseln kontinuierlich dosiert freisetzten (siehe Bild oben). Doch haben solcherart Tricks Grenzen, denn wie wir auch erkannten, dürfen die Adern den später implantierten Zellen nicht zu viel Raum wegnehmen. Wir versuchen nun, die Gefäßbildung durch Einsatz mehrerer Sorten von Wachstumsfaktoren genauer zu kontrollieren.

Bisher lässt sich ein neues Stück Herzgewebe von gewünschter Form, Zusammensetzung und Funktion am besten außerhalb des Körpers im Kulturgefäß heranzüchten. Sofern ein Patient eine Herzruptur überlebt, wäre ihm mit dem Einbau einer zellfreien Matrix nicht geholfen, sondern man müsste ein größeres Gewebestück einsetzen. Doch noch ist es schwierig, die vorgezüchteten Zellen auch im Körper lange genug am Leben zu halten, bis endlich Gefäße zu ihrer Versorgung gewachsen sind.

Im Augenblick probieren wir darum, aderdurchzogene Herzmuskeltransplantate im Labor herzustellen. Schablonen mit Kapillarnetzen konnten wir im Bioreaktor schon konstruieren. Dazu versetzten wir die Alginatgerüste mit Endothelzellen, die Blutgefäße normalerweise auskleiden. Als Nächstes möchten wir gleichzeitig Endothel- und Herzmuskelzellen in die Matrix einbringen. Falls dies erfolgreich ist, bleibt immer noch unsicher, ob die Kapillarnetze an die umgebenden Gefäße Anschluss finden – und wenn ja, wie schnell. Schaffen sie es rasch, das Transplantat zu versorgen, hätte dieses sehr gute Überlebensaussichten.

Glücklicherweise arbeiten viele andere Wissenschaftler auf das gleiche Ziel hin, und sie erforschen teils ganz verschiedene Verfahren (siehe Kasten links). Je mehr sich die Ansätze gegenseitig befruchten, umso schneller kommen wir voran. Es mag noch fünfzehn Jahre dauern, doch der Traum, das Herz eines Infarktpatienten mit einem Muskelimplantat zu reparieren, erscheint heute durchaus nicht mehr abwegig. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Smadar Cohen und **Jonathan Leor** arbeiten seit sechs Jahren gemeinsam an der Entwicklung von Herzmuskelimplantaten. Smadar Cohen ist Professorin für Biotechnologie an der Ben-Gurion-Universität des Negev in Beer Sheva (Israel). Jonathan Leor arbeitet als Kardiologe am Sheba Medical Center in Tel-Hashomer (Israel), wo er das Neufield Cardiac Research Institute der Tel-Aviv-Universität leitet.

Tissue engineering: Current state and perspectives. Von Erin Lavik und Robert Langer in: Applied Microbiology and Biotechnology, Bd. 65, Heft 1, S. 1, Juli 2004

Myocardial tissue engineering: Creating a muscle patch for a wounded heart. Von Jonathan Leor und Smadar Cohen in: Annals of the New York Academy of Sciences, Bd. 1015, S. 312, Mai 2004

The beat goes on. Von Catherine Zandonella in: Nature, Bd. 421, S. 884, 27. Februar 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Heiße Aussichten für Tieftemperatur-

Magnesiumdiborid widerspricht dem herkömmlichen Wissen über Supraleiter. Die Verbindung wird bei der relativ hohen Temperatur von 40 Kelvin supraleitend – was eine Reihe interessanter Anwendungen verspricht.

Von Paul C. Canfield und Sergey L. Bud'ko

Angenommen, Sie würden in Ihrem Garten, den Sie gut zu kennen meinen, unvermittelt eine Goldader entdecken. Ein ähnliches Goldrauschgefühl erfasste die Festkörperphysiker im Jahr 2001, als eine Forschungsgruppe verkündete, Magnesiumdiborid (MgB_2) könne bereits bei Temperaturen nahe 40 Kelvin widerstandsfrei elektrischen Strom leiten.

Diese einfache chemische Verbindung wird bereits seit einem halben Jahrhundert untersucht und in manchen Labors für Standardanwendungen eingesetzt – ohne dass jemand ihr enormes Potenzial erahnte. Wenngleich 40 Kelvin (also 40 Grad über dem absoluten Nullpunkt oder –233 Grad Celsius) ziemlich frostig klingen, ist dieser Wert doch fast doppelt so hoch wie der bisherige Rekord für metallische Supraleiter (rund 23 Kelvin für die in Forschung und Industrie häufig verwendeten Niob-Legierungen). Eine solch hohe Sprungtemperatur – die Temperatur, unterhalb derer ein Supraleiter elektrischen Strom verlustfrei leitet – lässt sich mit viel geringerem technischen Aufwand erreichen. Zu den potenziellen Anwendungen zählen supraleitende Magnete und Stromleitungen.

Im Gegensatz zu den Hochtemperatursupraleitern (Kupferoxid enthaltende Materialien, die schon bei Temperaturen unterhalb von 130 Kelvin supraleitend werden) ist MgB_2 eher ein herkömmlicher Supraleiter – allerdings eine neue Variante. Physiker hatten bei ihrer jahrzehntelangen Suche nach immer höheren Sprungtemperaturen Faustregeln für möglichst aussichtsreiche Elementkombinationen aufgestellt. Zudem vermuteten die meisten von ihnen, dass herkömmliche Supraleiter eine Sprungtemperatur von 23 Kelvin nicht nennenswert überschreiten könnten. Zu ihrer großen Überraschung widersprach MgB_2 diesen Regeln – und durchbrach die bisher vermutete Temperaturobergrenze.

Aufregung in der Physikergemeinde

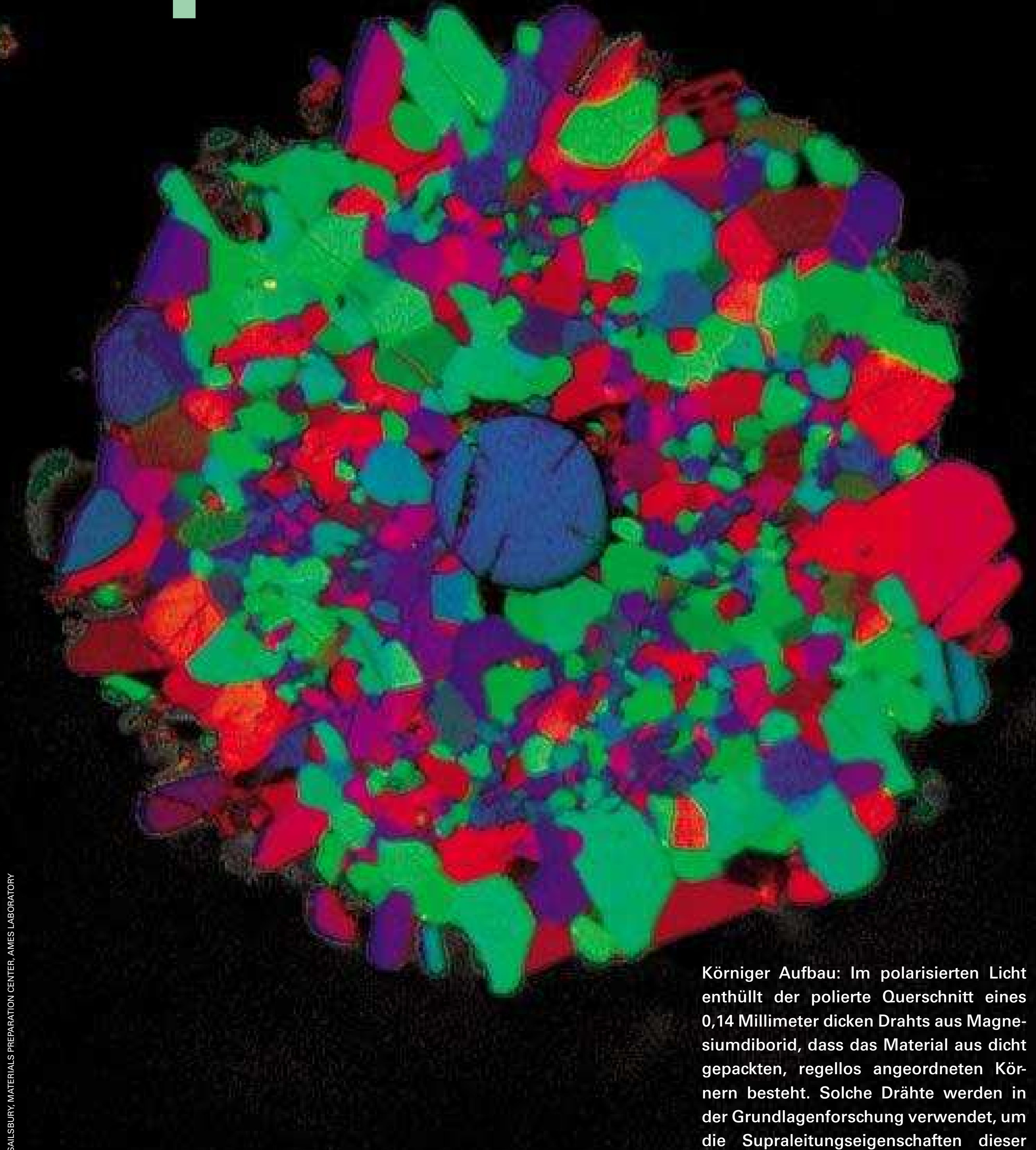
Erstaunlich schnell konnten die Supraleitungsforscher ihr Wissen um Magnesiumdiborid vertiefen. Mitte Januar 2001 hatte Jun Akimitsu von der Aoyama-Gakuin-Universität in Tokio die Entdeckung auf einer Konferenz vorgestellt. Bereits zwei Monate später wurden auf der Jahrestagung der American Physical Society rund hundert Zwei-Minuten-Vorträge zu diesem Thema gehalten, außerdem waren auf arxiv.org – einer Webseite für wissenschaftliche Veröffentlichungen – bereits 70 Forschungsarbeiten elektronisch erhältlich.

Für diesen ungewöhnlichen Aktivitätsschub gab es mehrere Gründe. Erstens ist es – wenn man herausgefunden hat, wie – recht einfach, relativ reines MgB_2 herzustellen. Zweitens profitierten die Festkörperphysiker von der schnellen Kommunikation über das Internet. Diese beiden Umstände, kombiniert mit der Aussicht auf einen neuen, einfach zu handhabenden Supraleiter mit hoher Sprungtemperatur, schlugen die Physikergemeinde in ihren Bann.

Zunächst breiteten sich Informationen über Akimitsus Entdeckung nur mündlich oder per E-Mail aus. Es gab weder eine wissenschaftliche Veröffentlichung noch ein elektronisch verfügbares Manuskript. Als unsere Gruppe wenige Tage nach der Konferenz davon hörte, stellten wir uns einige Fragen: Können wir eine hochreine feste Probe aus diesem Material herstellen? (Kommerziell erhältliches MgB_2 liegt als nicht besonders reines Pulver vor.) Wird es tatsächlich bei 40 Kelvin supraleitend? (Über zwei Jahrzehnte lang verfolgten uns immer wieder »USOs«, wie wir »unidentifizierbare supraleitende Objekte« scherzhaft abkürzten – Verbindungen, deren angeblich extrem hohe Sprungtemperatur von niemandem reproduziert werden konnte.) Können wir, falls MgB_2 tatsächlich ein Supraleiter ist, den ursächlichen Mechanismus ergründen? Und schließlich: Können wir einige grundlegende Eigenschaften dieser Verbindung beschreiben? Zu unser aller Glück ließen sich diese Fragen allesamt bejahen.

Die Gerüchte um Akimitsus Entdeckung markierten für uns und für andere Forschergruppen den Beginn einer be- ▷

Supraleiter



HAL SAILSBURY, MATERIALS PREPARATION CENTER, AMES LABORATORY

Körniger Aufbau: Im polarisierten Licht enthüllt der polierte Querschnitt eines 0,14 Millimeter dicken Drahts aus Magnesiumdiborid, dass das Material aus dicht gepackten, regellos angeordneten Körnern besteht. Solche Drähte werden in der Grundlagenforschung verwendet, um die Supraleitungseigenschaften dieser Verbindung zu untersuchen.

▷ triebsamen, wundervollen Zeit. Unser Team ist darauf spezialisiert, die physikalischen Eigenschaften metallischer Verbindungen zu untersuchen. Als wir von den neuen Befunden hörten, nahmen wir sofort unsere bisherigen Materialien aus den Öfen und begannen, MgB_2 herzustellen.

Anfangs war das gar nicht so einfach. Magnesiumdiborid ist eine so genannte intermetallische Verbindung – eine, die zwei oder mehr leitende Bestandteile enthält. Die einfachste Methode zu deren Herstellung – das gemeinsame Schmelzen beider Elemente – erwies sich wegen der stark unterschiedlichen Schmelzpunkte als nicht praktikabel: Magnesium schmilzt bei 650, Bor erst bei über 2000 Grad Celsius. Da Magnesium bei knapp über 1100 Grad Celsius bereits zu sieden beginnt, verflüchtigt es sich, bevor es eine Verbindung mit Bor eingehen kann.

Doch die Verdampfung des Magnesiums macht eine andere Herstellungsmethode möglich: Wir versiegelten ein Stück Magnesium und etwas Borpulver in einem Gefäß aus dem reaktionsträgen Metall Tantal. Dann erhitzten wir das Gefäß samt Inhalt auf eine Temperatur, bei der das Magnesium gerade noch nicht siedet (rund 950 Grad Celsius). Magnesium hat einen vergleichsweise hohen Dampfdruck. Bei 950 Grad stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem der Druck des verdampften Magnesiums über der Schmelze ein Drittel des normalen Luftdrucks beträgt. Wir erwarteten, dass der dichte Dampf in das feste Bor diffundieren würde. Tatsächlich bildete sich auf diese Weise innerhalb von zwei Stunden sehr reines MgB_2 – in der Form von lose gesinterten Kügelchen (ähnlich wie Sandstein). So hatten wir nur drei Tage, nachdem wir die Gerüchte gehört hatten, selbst die Kügelchen hergestellt und konnten bestätigen, dass die Verbindung bei 40 Kelvin supraleitend wird.



Verräterische Gitterschwingungen

Danach beschäftigte uns die nächste brennende Frage: Handelte es sich um einen herkömmlichen Supraleiter, dessen Funktion sich mit der seit Langem bewährten BCS-Theorie erklären lässt, die nach ihren Begründern John Bardeen, Leon N. Cooper und J. Robert Schrieffer benannt ist? Falls ja, dann wäre die ungewöhnlich hohe Sprungtemperatur erklärungsbedürftig, aber das Potenzial für technische Anwendungen wäre gewaltig. Falls sich ein exotischerer Mechanismus dahinter verbergen würde, so wäre dies für die Grundlagenforschung eine bedeutende Entdeckung.

IN KÜRZE

▶ Im Jahr 2001 entdeckten japanische Wissenschaftler, dass die an sich recht unscheinbare Verbindung **Magnesiumdiborid** bei Temperaturen unterhalb von etwa 40 Kelvin elektrischen Strom verlustfrei leitet. Diese Sprungtemperatur ist rund doppelt so hoch wie die anderer verwandter Supraleiter.

▶ Für **praktische Anwendungen** muss die Verbindung auf 20 bis 30 Kelvin gekühlt werden. Das ist mit flüssigem Neon oder Wasserstoff als Kühlmittel oder mit Kältemaschinen möglich – und somit billiger und weniger störanfällig als die Kühlung mit flüssigem Helium auf rund 4 Kelvin, die für die derzeit gebräuchlichsten Supraleiter aus Niob-Legierungen erforderlich ist.

▶ Durch gezielten Einbau von Kohlenstoff oder anderen Elementen in das Kristallgitter von Magnesiumdiborid erreichen oder übertreffen die **Supraleitfähigkeitseigenschaften** dieser Verbindung diejenigen von Niob-Legierungen. Zu möglichen Anwendungen zählen supraleitende Magnete, Hochspannungsleitungen und hochempfindliche Detektoren für magnetische Felder.

Aus verschiedenen Gründen vermuteten einige Forscher, MgB_2 sei kein normaler BCS-Supraleiter. Erstens lagen – bevor 1986 die Hochtemperatursupraleiter entdeckt wurden – die höchsten gefundenen Sprungtemperaturen zwei Jahrzehnte lang bei Werten um 20 Kelvin. Deshalb vermuteten einige Theoretiker, die maximal erreichbare Sprungtemperatur von Verbindungen, die den BCS-Regeln unterliegen, könne höchstens um die 30 Kelvin betragen. Zwar übertreffen die Hochtemperatursupraleiter auf Kupferoxid-Basis diesen Wert deutlich, doch gelten sie nicht als BCS-Typ.

Zweitens verletzte die relativ hohe Sprungtemperatur (auch als kritische Temperatur oder kurz T_c bezeichnet) von MgB_2 eine alte Faustregel, die für die Suche von intermetallischen Verbindungen mit hoher T_c galt: Je mehr Elektronen am Phasenübergang in den supraleitenden Zustand beteiligt sind, desto höher sollte die Sprungtemperatur sein. Weder Magnesium noch Bor bringen besonders viele Elektronen in die MgB_2-Verbindung ein.

Es gibt einen einfachen Test dafür, ob ein Supraleiter in die Klasse der BCS-Typen gehört. Eine Schlüsselrolle in der BCS-Theorie spielen nämlich die so genannten Gitterschwingungen; je höher deren Frequenz, desto höher sollte die Sprungtemperatur des Supraleiters sein. Die Schwingungen lassen sich durch ein mechanisches Modell verdeutlichen, in dem man sich die chemischen Bindungen zwischen den Atomen eines Kristallgitters durch starke Spiralfedern ersetzt denkt. Eine äußere Anregung wie beispielsweise Energiezufuhr durch Erhit-

zen bewirkt, dass die einzelnen Atome mit einer charakteristischen Frequenz zu schwingen beginnen. Wie für makroskopische Gegenstände gilt auch im Kristall: Die charakteristische Frequenz ist umso niedriger, je größer die Masse der schwingenden Atome ist. Indem wir unterschiedliche Magnesium- oder Bor-Isotope verwenden, können wir die Masse der schwingenden Atome im MgB_2-Kristallgitter gezielt beeinflussen. Dadurch verändert sich die Schwingungsfrequenz und in deren Folge auch T_c.

Bor hat zwei stabile, natürlich vorkommende Isotope: Bor-10 und Bor-11. Gemäß der BCS-Theorie sollte die Sprungtemperatur zweier MgB_2-Proben, die aus Bor-10 beziehungsweise Bor-11 hergestellt wurden, um 0,85 Kelvin differieren, sofern keine Sondereffekte zu berücksichtigen sind. Mit unseren ersten gesinterten MgB_2-Kügelchen maßen wir einen Temperaturunterschied von einem Kelvin. Dass dies geringfügig höher war als erwartet, hängt offenbar damit zusammen, dass die Schwingungen der Boratome einen höheren Einfluss auf die Supraleitereigenschaft haben als diejenigen der Magnesiumatome (siehe Kasten auf S. 64).

Verlustfreie Überlandleitungen?

Unser Befund legte den Schluss nahe, dass MgB_2 höchstwahrscheinlich ein BCS-Supraleiter ist – allerdings einer mit extrem hoher Sprungtemperatur. Demnach war die Vorhersage der Theoretiker, wonach bei etwa 30 Kelvin eine Obergrenze erreicht sei, offenbar unzutreffend. Dies war durchaus eine gute Nachricht: Denn gewöhnliche intermetallische BCS-Supraleiter lassen sich weit einfacher handhaben und leichter zu brauchbaren Drähten verarbeiten als Supraleiter auf Kupferoxid-Basis.

Uns kam in der Tat plötzlich die Idee, MgB_2-Drähte einfach dadurch herzustellen, dass wir Borfäden Magnesiumdampf aussetzen (siehe Kasten rechts). Solche Drähte sind meist nützlicher als gesinterte Kügelchen – für Laborexperimente ebenso wie für praktische Anwendungen wie etwa als Magnete.

Auch wenn Supraleitung nur bei sehr niedrigen Temperaturen auftritt, hat sie bereits heute vielfältigen praktischen Nutzen. Ihr offenkundigster Vorzug ist, dass hohe elektrische Ströme ohne jegliche Verluste fließen und sich infolgedessen das Leitungsmaterial nicht erhitzt. Ein Anwendungsbeispiel sind supraleitende Elektromagneten, die Feldstärken bis über 20 Tesla erreichen können (rund 500-mal stärker als ein handelsüblicher Magnet zum Anheften von Notizen). Derartige Magnete (aber auch schwächere) werden in Teilchenbeschleunigern, Forschungslabors und Computertomografen eingesetzt. Die Verkaufszahlen für solche Magnete, die aus Niob-Verbindungen und -Legierungen hergestellt werden, steigen kontinuierlich.

Ein weitere potenzielle Anwendung sind verlustfreie Überlandleitungen aus Supraleitern, die viel höhere Stromdichten erlauben als herkömmliche Leitungen. Bislang haben Forscher erfolgreich einige Prototypen aus Kupferoxid-Supraleitern getestet, die mit flüssigem Stickstoff auf 77 Kelvin gekühlt wurden. ▷

Herstellung von MgB_2-Drähten

Nur wenige Wochen nach der Entdeckung von Supraleitung in Magnesiumdiborid (MgB_2) entwickelten wir ein Verfahren für die Herstellung von Drähten aus dem Erfolg versprechenden Material. Wir ließen dazu Magnesiumdampf mit festem Bor reagieren – ein Prozess, der bei Temperaturen nahe 1000 Grad Celsius innerhalb einiger Stunden abläuft. Dabei diffundiert das Magnesium in das Bor hinein und wandelt es in MgB_2 um (wobei dieses stark aufquillt). Der Vorgang ist vergleichbar mit einem trockenen Schwamm, der sich an einem feuchten Tag mit Wasserdampf vollsaugt. Die Reaktion gelingt auch mit Borfasern, die in Längen von einigen hundert Metern erhältlich sind; der Ausgangsdurchmesser betrug in unseren Versuchen zwischen 0,1 und 0,3 Millimeter.



NORMAN E. ANDERSON, JR.

Dünne Drähte lassen sich durch Einwirken von Magnesiumdampf auf Borfasern herstellen.

Die auf diese Weise hergestellten Drähte eignen sich hervorragend für die Grundlagenforschung. Mit ihnen können die physikalischen Eigenschaften von MgB_2 untersucht werden. Bevor solche Drähte praktisch eingesetzt werden können, müssen sie mit einem leitfähigen, dehnbaren Mantel versehen werden, der ihre mechanische Belastbarkeit erhöht. (Der leitfähige Mantel kann zudem für den Fall, dass der Supraleiter versagt, weiterhin Strom transportieren, was eine Überhitzung und Zerstörung des MgB_2 vermeidet.) Bislang allerdings wurde noch kein geeigneter Mantel entwickelt.

Aufgeschnitten enthüllt der Magnesiumdiborid-Draht einen zentralen Kern aus Wolframborid mit 0,015 Millimeter Durchmesser.



HAL SALSBURY, MATERIALS PREPARATION CENTER, AMES LABORATORY

In einem geläufigeren Verfahren füllt man Magnesium- und Borpulver oder pulverförmiges MgB_2 in ein Röhrchen. Dieses wird dann zu einem Draht ausgezogen und so behandelt, dass festes Magnesiumdiborid entsteht. Mit dieser Technik wurden Labormuster von Drähten in einer Länge zwischen einigen Dutzend und einigen hundert Metern hergestellt.

Wenngleich MgB_2 erst seit Kurzem als Supraleiter bekannt ist, arbeiten Firmen bereits an einer Kommerzialisierung des Materials.

Geschichte der Supraleitung

Der Niederländer Heike Kamerlingh Onnes entdeckte 1911 das Phänomen der Supraleitung, als er die elektrischen Eigenschaften von Metallen bei tiefen Temperaturen untersuchte. Als er Quecksilber mit flüssigem Helium auf 4,2 Kelvin abkühlte, verlor es unvermittelt seinen elektrischen Widerstand. Die Temperatur, bei der dieser Übergang vom normalen zum idealen Leiter auftritt, nennen die Physiker Sprungtemperatur oder kritische Temperatur (abgekürzt T_c).

Im Lauf der folgenden fünfzig Jahre wurden weitere supraleitende Materialien mit immer höherer kritischer Temperatur entdeckt. Alle diese Supraleiter waren entweder reine Metalle oder intermetallische Verbindungen (die aus zwei oder mehr metallischen Elementen bestehen). Doch seit den 1960er Jahren gelang es trotz intensiver Forschungen nicht, die Obergrenze für T_c über den bereits erreichten Wert von etwa 23 Kelvin hinauszutreiben.

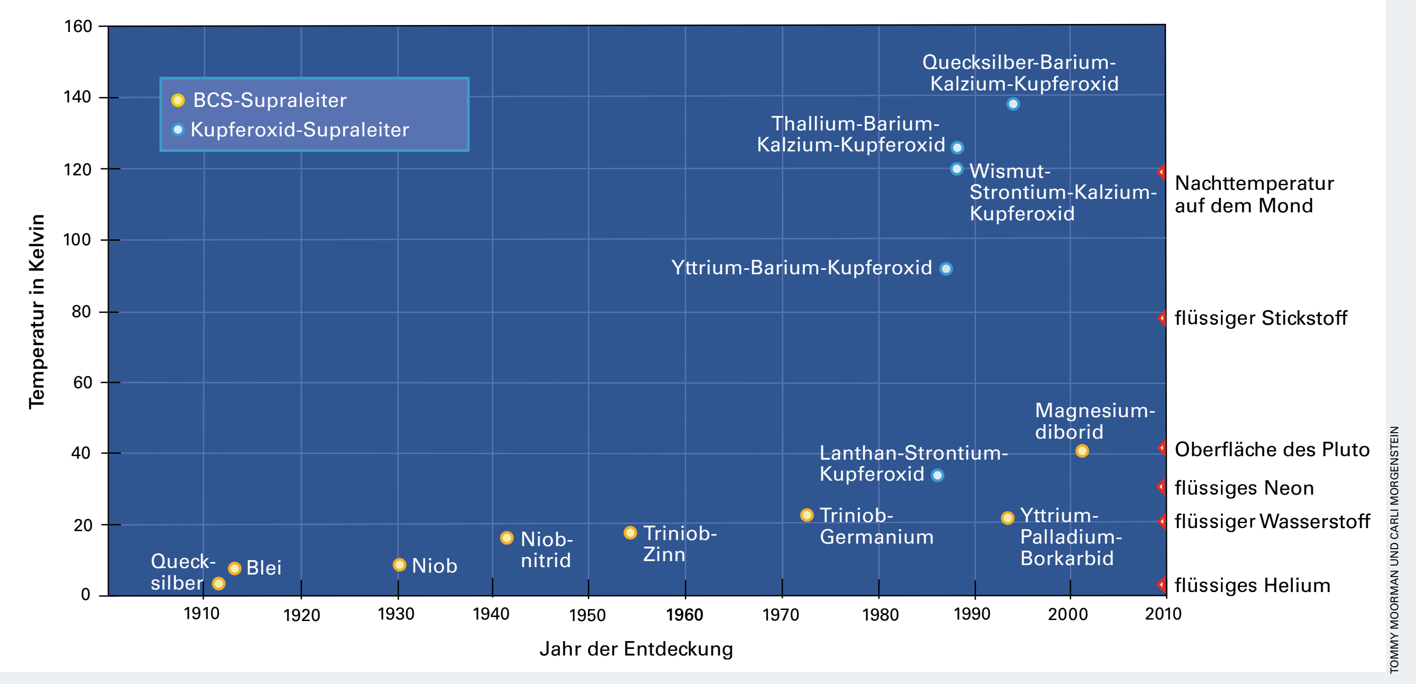
Dies änderte sich 1986 schlagartig mit der Entdeckung der Hochtemperatursupraleiter durch Johannes Georg Bednorz und Karl Alex Müller am IBM-Forschungszentrum in Rüschlikon (Zürich). Auch für diese Kupferoxid-Verbindungen schossen die erreichten Werte für T_c immer weiter nach oben; Quecksilber-Barium-Kalzium-Kupferoxide erreichten sogar eine Sprungtemperatur von etwa 130 Kelvin. Dies war für Forscher eine faszinierende Zeit. Ihnen wurde schnell klar, dass die bisherige Theorie der Supraleitung – die so genannte BCS-Theorie (siehe Kasten auf S. 62) – nicht geeignet war, den Widerstandsverlust in diesen neuen Materialien zu erklären. Obwohl Physiker sich die letzten zwanzig Jahre eingehend damit befassten, steht eine überzeugende Theorie, wie und warum Kupferoxide Strom widerstandsfrei leiten, bis heute aus.

Diese Verbindungen stellen auch werkstofftechnisch eine Herausforderung dar. Anfangs war es sehr schwierig, sie hochrein oder als Einkristall herzustellen, was die Beschreibung ihrer grundlegenden Eigenschaften erschwerte. Zudem war es nicht leicht, sie zu Drähten zu verarbeiten: Im Gegensatz zu intermetallischen Supraleitern müssen die einzelnen Körner, aus denen diese Oxide bestehen, in bestimmter Richtung zueinander ausgerichtet sein, damit der Draht technisch verwendbar ist. Wegen dieser Probleme wünschten sich Forscher und Ingenieure ein Material, das ähnlich einfach zu handhaben ist wie die intermetallischen Supraleiter, zugleich aber eine kritische Temperatur oberhalb von 20 Kelvin aufweist.

Zu Beginn des neuen Jahrtausends waren – je nach technischem und finanziellem Aufwand – unterschiedliche Supraleiter verfügbar. Mit den Oxiden ließen sich bereits durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff, das bei 77 Kelvin siedet, Supraleiter in der Praxis einsetzen. Die älteren intermetallischen Verbindungen wie Triniob-Zinn wurden in Labors und für Magnete in medizinischen Geräten verwendet; sie benötigen Arbeitstemperaturen von 4 Kelvin, die durch aufwändige Kühlung mit flüssigem Helium erreicht wird.

Darum war die Entdeckung der Supraleitung in Magnesiumdiborid im Jahr 2001 genau das, was allen fehlte: Das Material zählt zu den einfach zu handhabenden intermetallischen Verbindungen, hat aber eine kritische Temperatur von knapp 40 Kelvin – rund doppelt so hoch wie die bisheriger intermetallischer Supraleiter.

Supraleiter im Lauf der Jahrzehnte



TOMMY MOORMAN UND CARLI MORGENSTEIN

▷ Für den technischen Einsatz muss ein Supraleiter im Allgemeinen deutlich unter die Sprungtemperatur abgekühlt werden – auf Werte zwischen dem 0,5- und dem 0,7fachen von T_c. Denn je näher die Betriebstemperatur an T_c liegt, desto größer ist die Gefahr, dass die Supraleitung durch hohe Ströme oder starke Magnetfelder zerstört wird. Demnach sollte ein Material, dessen Sprungtemperatur 20 Kelvin beträgt, bei einer Temperatur von ungefähr 10 Kelvin betrieben werden. Für die Kühlung käme somit nur flüssiges Helium in Frage – was nicht nur kostspielig, sondern auch äußerst aufwändig wäre.

Anwendungsorientierte Forscher interessieren sich vor allem deshalb für Magnesiumdiborid, weil es einfacher auf eine verträgliche Betriebstemperatur gekühlt werden kann als die heute verwendeten Niob-Legierungen und -Verbindungen, die eine niedrigere Sprungtemperatur aufweisen. Als Kühlmittel für MgB_2 eignen sich flüssiger Wasserstoff oder flüssiges Neon; auch sind Kälteanlagen mit geschlossenem Kühlkreislauf, die leicht Temperaturen unter 20 Kelvin erreichen, zu einem erschwinglichen Preis erhältlich.

Doch um diese Vision zu verwirklichen, muss MgB_2 gute Supraleitereigenschaften aufweisen. Forscher achten vor allem auf die Mischphase eines Supraleiters, bei der ein äußeres Magnetfeld die Supraleitereigenschaft teilweise eliminiert. In den meisten Alltagsanwendungen wird sich das Material in dieser Phase befinden. Schwache Magnetfelder reichen nicht aus, um die Mischphase zu erzeugen – sie dringen nicht ins Innere des Supraleiters ein, sodass er supraleitend bleibt. Magnetfelder mittlerer Stärke hingegen können in den Supraleiter eindringen: Sie bilden feine »Schläuche« im magnetischen Fluss, so genannte Wirbel. Das Innere dieser Flussschläuche ist normalleitend, außerhalb von ihnen bleibt das Material jedoch supraleitend.

In dieser Mischphase weisen Supraleiter immer noch viele ihrer nützlichen Eigenschaften auf. Doch je stärker das äußere Magnetfeld wird, desto höher wird der prozentuale Anteil des durch die Flussschläuche in seiner Supraleitung beeinträchtigten Materials – bis zu dem Punkt, an dem sie sich komplett überlagern: Erfüllen die Flussschläuche den gesamten Supraleiter, so verliert er seine Supraleitfähigkeit. Die Feldstärke, bei der dies eintritt, wird als obere kritische Feldstärke bezeichnet. Sie ist ein Maß dafür, welchen praktischen Nutzwert ein Supraleiter hat.

»Eine fantastische Verbesserung«

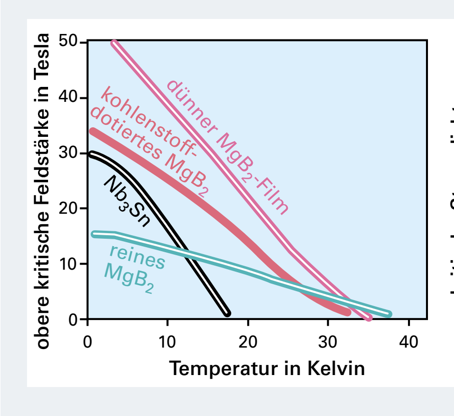
Im technischen Einsatz sind Supraleiter zumeist mittelstarken Magnetfeldern ausgesetzt (das Magnetfeld reicht aus, um seine Funktion zu erfüllen, aber es eliminiert die Supraleitfähigkeit nicht). Das Ziel besteht also darin, die Bandbreite von Temperaturen und Feldstärken, innerhalb derer der Supraleiter in der Mischphase verbleibt, zu maximieren. Temperaturen spielen bei diesen Betrachtungen ebenfalls eine Rolle, weil die obere kritische Feldstärke eines Supraleiters von der Temperatur abhängig ist. Knapp unterhalb T_c liegt die obere kritische Feldstärke fast bei null. Das bedeutet, dass schon kleinste äußere Magnetfelder die Supraleitereigenschaft eliminieren können. Bei tieferen Temperaturen hingegen hält der Supraleiter auch stärkeren Störfeldern stand (siehe Kasten oben).

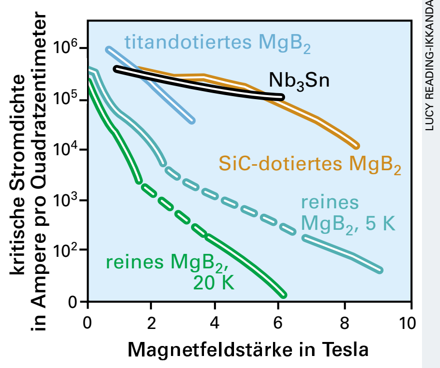
Zum Glück lässt sich die obere kritische Feldstärke eines supraleitenden Materials in gewissen Grenzen beeinflussen – vorzugsweise durch gezielte Zugabe von Fremdatomen. Wird beispielsweise etwas Bor durch Kohlenstoff ersetzt, steigt die obere kritische Feldstärke deutlich. Unser Team und andere Forschergruppen konnten zeigen, dass sich bei einer fünfprozentigen Kohlenstoffsubstitution die obere kritische Feldstärke von MgB_2 mehr als verdoppelt – eine fantastische und bedeutende Verbesserung.

Des Weiteren zeigte ein Team um David C. Larbalestier an der Universität von Wisconsin in Madison, dass dünne Filme aus MgB_2 noch höhere Werte für die obere kritische Feldstärke aufweisen – weit oberhalb des Werts für Trinioб-Zinn (Nb_3Sn). Dieser Befund gibt Forschern Rätsel auf: Was ist die Ursache der Erhöhung? Handelt es sich um geringe Mengen Sauerstoff? Ist es ein anderes Element, das sich unbemerkt einlagert und die Materialeigenschaften in unbekannter Weise verändert? Ist es eine Dehnung der MgB_2-Struktur in den Filmen? Wie auch immer: Bereits jetzt ist klar, dass MgB_2 ein aussichtsreiches Material für die Herstellung von supraleitenden Magneten ist. Es verrichtet sei- ▷

Verbesserte Performance

Für den praktischen Einsatz ist es besonders wichtig, dass die Supraleitung auch in äußeren Magnetfeldern und bei starkem Stromfluss erhalten bleibt. Die Kurven in den beiden Diagrammen zeigen, wie das gezielte Hinzufügen von Fremdatomen – eine so genannte Dotierung – die Eigenschaften von MgB_2 verbessern konnte. Inzwischen übertrifft dieses Material teilweise die Eigenschaften des industriell häufig verwendeten Triniob-Zinn (Nb_3Sn). Die Kurvenverläufe links zeigen, dass Drähte aus kohlenstoff-dotiertem MgB_2 und ein dünner Film aus MgB_2 mit unbekannten Zusätzen bei allen untersuchten Temperaturen einem hohen Magnetfeld (kritische obere Feldstärke) besser standhalten als Nb_3Sn. Die rechten Graphen (erstellt für 4 Kelvin, sofern nicht anders gekennzeichnet) zeigen, dass siliziumkarbid-dotiertes MgB_2 ähnliche Stromleitungseigenschaften aufweist wie Nb_3Sn, während andere Eigenschaften geringfügig schlechter ausfallen. Gepunktete Linien stehen für Interpolationen.



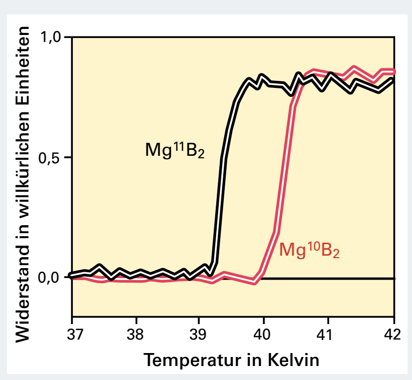


LUCY READING-IKKANDA

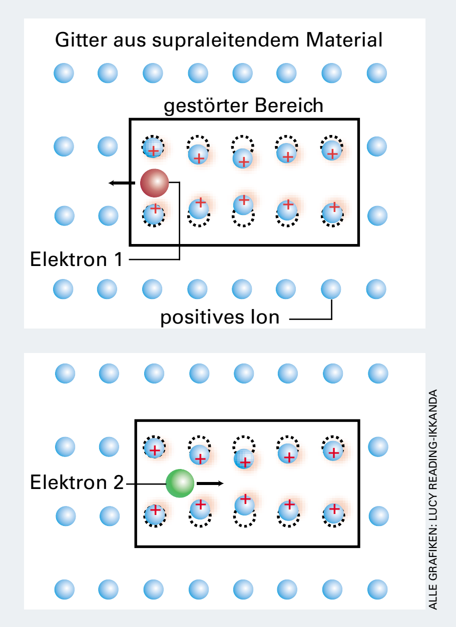
Die BCS-Theorie

Im Jahr 1957 präsentierten die Physiker John Bardeen, Leon N. Cooper und J. Robert Schrieffer eine Erklärung für die Supraleitung in Metallen – eine Theorie, die nach den Anfangsbuchstaben ihrer Namen benannt wurde. In normalleitenden Metallen werden Elektronen an Defekten oder Störstellen gestreut, was den elektrischen Widerstand hervorruft. Geht ein Material in den supraleitenden Zustand über, koppeln sich die Elektronen gemäß der BCS-Theorie zu einem Kollektiv zusammen, das sich ohne Streuung fortbewegen kann.

Die Grundelemente dieses neuen Elektronenzustands sind so genannte Cooper-Paare, in denen jeweils zwei Elektronen schwach aneinander gebunden sind. Eine solche Anziehung zweier gleich geladener Teilchen erscheint zunächst unplausibel. Sie ist aber möglich, weil sich die negativen Elektronen durch ein Gitter aus positiven Atomrümpfen bewegen. Jeder Partner eines Cooper-Paars zieht auf seinem Weg eine Störung positiver Ladung hinter sich her, durch die ein zweites Elektron angezogen wird (Bild rechts). Auf diese Weise bindet die Gitterverzerrung beide Elektronen locker aneinander. (Genauer gesagt sind Gitterschwingungen bestimmter Frequenz an dieser Bindung beteiligt.) Eine grobe Analogie sind zwei Kinder, die auf einem großen Trampolin springen. Obwohl zwischen beiden Kindern keine Anziehung besteht, kommen sie sich tendenziell näher – eine Folge der Verzerrung, die das jeweils andere Kind in der Trampolin-Bespannung erzeugt.



Isotopeneffekt: Der Wert der kritischen Temperatur von MgB_2 hängt davon ab, ob es mit dem Isotop Bor-10 oder Bor-11 hergestellt wurde.



Ein Leitungselektron verzerrt das regelmäßige Gitter aus positiven Ionen (oben). Die daraus resultierende Konzentration positiver Ladungen zieht ein zweites Elektron an (unten).

Die einzelnen Cooper-Paare überlagern sich, und unterhalb der kritischen Temperatur T_c nehmen sie einen ausgedehnten elektronischen Zustand an, bei dem keinerlei elektrischer Widerstand mehr auftritt.

Einer vereinfachten Version der BCS-Theorie zufolge bestimmen drei Eigenschaften eines Materials den Wert von T_c: Die kritische Temperatur ist umso höher,

- je mehr Elektronen am supraleitenden Zustand beteiligt sein können,
- je höher die charakteristische Frequenz der Gitterschwingungen ist, die an der Kopplung der Elektronen in Cooper-Paaren mitwirken, und
- je stärker die Kopplung zwischen den Gitterverzerrungen und den Elektronen ist.

Jahrzehntelang war die Suche nach höheren T_c-Werten davon bestimmt, diese drei voneinander abhängigen Parameter zu optimieren – mit einer besonderen Präferenz für die beiden ersten. MgB_2 scheint indes wegen seiner stärkeren Elektron-Gitter-Kopplung – der dritten dieser Eigenschaften – einen höheren T_c-Wert aufzuweisen.

▷ nen Dienst bei höheren Temperaturen und möglicherweise sogar bei höheren äußeren Feldstärken als Triniob-Zinn – die derzeit bevorzugt in solchen Magneten verwendete Verbindung.

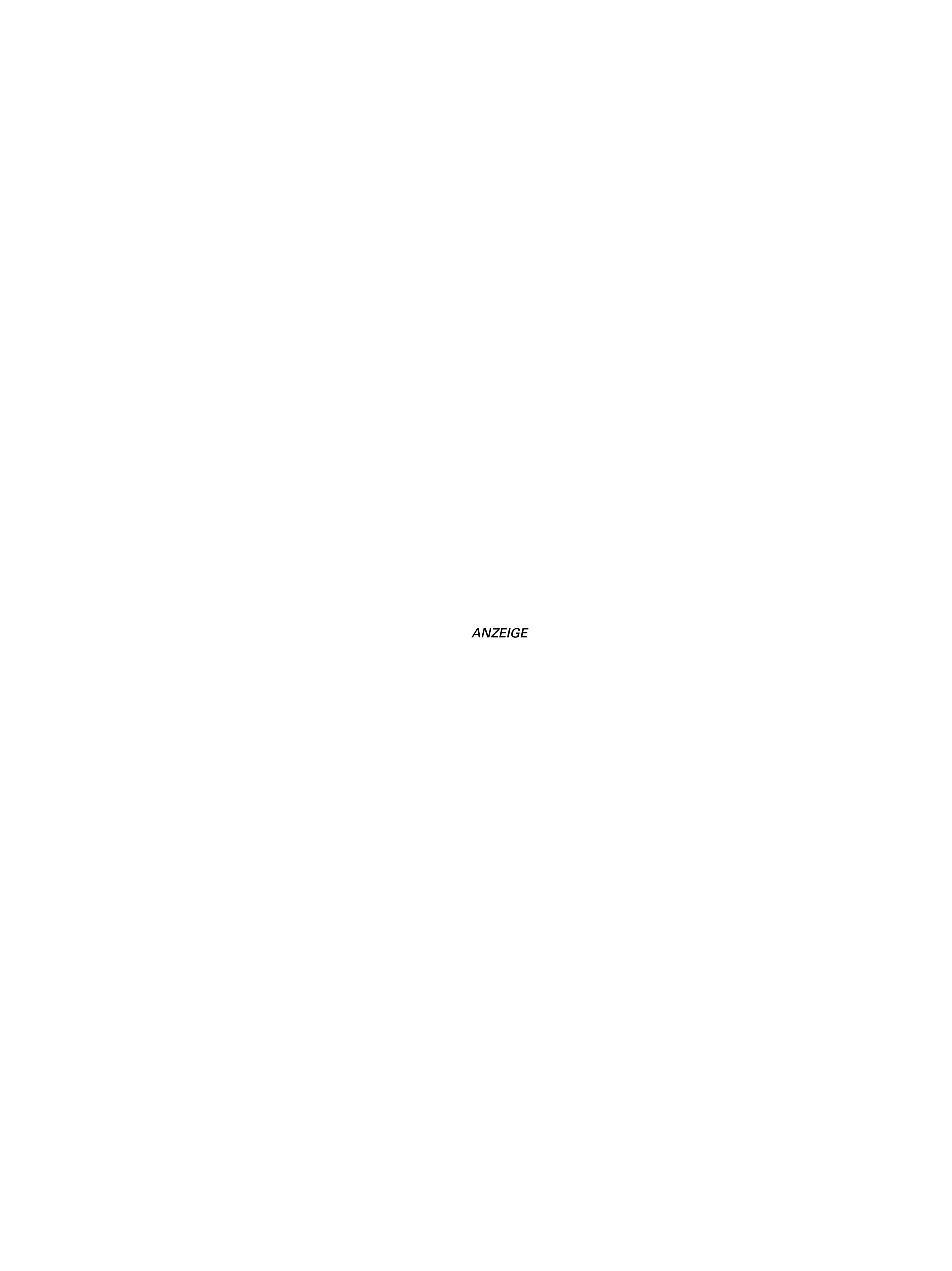
Aus Sicht der angewandten Physik ist die zweitwichtigste Eigenschaft von Supraleitern die kritische Stromdichte. Sie kennzeichnet den maximalen Strom, der durch einen Supraleiter fließen kann, ohne dass dieser seine widerstandslose Stromleitung verliert. Steigt die Stromdichte über den kritischen Wert, beginnen die Wirbel (also jene kleinen, nicht supraleitenden Regionen im Supraleiter) sich zu verschieben oder zu bewegen. Daraus resultiert ein Energieverlust – der elektrische Widerstand ist größer als null.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, können die Wirbel durch gezieltes Einbringen von Gitterdefekten festgehalten werden. Indem man die einzelnen Kristallite (oder Körner) des Supraleiters bei dessen Herstellung verkleinert, lässt sich ein solches Wirbel-Pinning (nach dem englischen Wort für Festnageln) oft unterstützen. Denn je kleiner die Kristallite, desto größer ist die Oberfläche an den Korngrenzen, an denen die Wirbel festgehalten werden. Eine weitere Methode zur Verbesserung des Wirbel-Pinnings besteht darin, winzige Einschlüsse von Materialien wie Yttriumoxid oder Titandiborid in den Supraleiter einzubringen.

Rohre für flüssigen Wasserstoff

Eine der größten Hürden, die der Anwendung von MgB_2 entgegensteht, ist die noch zu geringe kritische Stromdichte in starken Magnetfeldern. In schwachen Feldern gleicht die kritische Stromdichte zwar derjenigen von Triniob-Zinn, doch im Vergleich zu diesem Material fällt ihr Wert mit wachsender Feldstärke deutlich schneller ab. Das ist ein klarer Nachteil für den Einsatz in starken Magneten.

Andererseits haben die diversen Forschungsaktivitäten in den vier Jahren, die seit Entdeckung der Supraleitfähigkeit von MgB_2 verstrichen sind, die kritische Stromdichte bereits deutlich erhöhen können – nicht nur in schwachen Magnetfeldern, sondern insbesondere auch im Hochfeldregime. Weitere Fortschritte sind zu erwarten, wenn die Physiker ein tieferes Verständnis für die Vorgänge beim Wirbel-Pinning in MgB_2 entwickeln. ▷


ANZEIGE

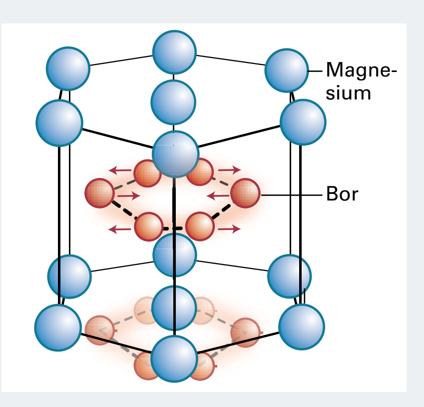
Struktur und Bindungen

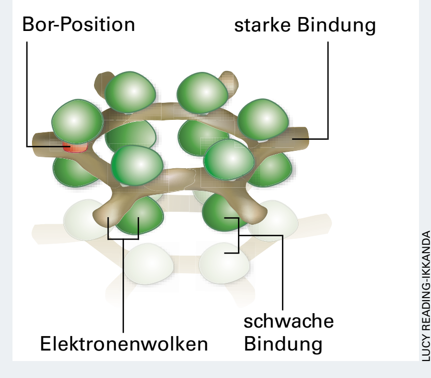
Einer der Hauptgründe für die überraschend hohe Sprungtemperatur von MgB_2 ist die Stärke der Wechselwirkung zwischen bestimmten Elektronen und bestimmten Gitterschwingungen. Diese starke Wechselwirkung ist auf die Struktur und die Bindungen des Materials zurückzuführen.

Die Boratome im MgB_2 sind in Form einer sechseckigen Honigwabe angeordnet (rechts, rot) und durch Schichten aus Magnesiumatomen (blau) voneinander getrennt. Die Elektronen, die sowohl für die gewöhnliche Leitfähigkeit als auch für die Supraleitung verantwortlich sind, finden sich in den Borschichten – sie sind bei einer der zwei möglichen Bindungen des Materials beteiligt (ganz rechts). Eine sehr starke Bindung besteht innerhalb der Sechseckebene – und eine viel schwächere zwischen den Borschichten.

Die Leitungselektronen der ebenen Bindungen werden von Gitterschwingungen innerhalb der Ebene erheblich beeinflusst (rote Pfeile). Diese starke Wechselwirkung oder Kopplung führt zu einem Zustand, der Supraleitung bei recht hohen Temperaturen ermöglicht.

MgB_2 hat eine sehr interessante physikalische Grundsatzdiskussion wiederbelebt: Kann die Supraleitung auf zwei unterschiedliche Gruppen von Elektronen (grüne und goldene Elektronenwolken) im Material zurückzuführen sein, die zwei verschiedene Kollektive aus Cooper-Paaren bilden? Die bisherigen experimentellen Befunde weisen darauf hin, dass MgB_2 das erste Beispiel für dieses Phänomen ist.





LUCY READING-IKKANDA

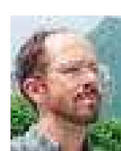
Die Entdeckung der Supraleitfähigkeit von MgB_2 ist einerseits das Ergebnis jahrzehntelanger gezielter Forschung in diesem Bereich. Andererseits führt sie vor Augen, dass die Natur nicht unseren unzulänglichen Beschreibungsversuchen zu gehorchen braucht. Obwohl MgB_2 als chemische Verbindung bereits seit über 50 Jahren bekannt ist, wurde das Material erst jetzt auf supraleitende Eigenschaften hin getestet. Dies ist teils darauf zurückzuführen, dass MgB_2 nicht in unser Bild von Kandidaten für intermetallische Supraleiter passte. Zum Glück hat die Natur gelegentlich wohlmeinende Überraschungen für uns parat.

In den vergangenen vier Jahren hat sich unser Verständnis der Supraleitereigenschaften von MgB_2 drastisch und erstaunlich schnell erhöht. Wir haben klare Vorstellungen der Eigenschaften von hochreinem MgB_2, und wir lernten, wie wir das Material verändern müssen, um es gegen Magnetfelder resistenter zu machen und seine kritische Stromdichte zu erhöhen – was den Nutzwert steigert. Seine Eigenschaften bei 20 bis 30 Kelvin konnten so weit verbessert werden, dass Starkstromanwendungen – etwa Magnete – mit Kühlmitteln wie flüssigem Wasserstoff, flüssigem Neon oder mit den gängigen Kälteanlagen realisierbar scheinen. Prototypen supraleitender Drähte und sogar einige Magnete konnten bereits im Labor gefertigt werden. Aber es ist noch viel Arbeit nötig, um den Supraleiter zu optimieren, seine materialspezifischen Eigenschaften zu verstehen und die Herstellungstechnik besser in den Griff zu bekommen.

Insgesamt sieht die Zukunft für MgB_2 recht viel versprechend aus – insbesondere dann, wenn eines Tages Wasserstoff in unserer Energieversorgung eine größere Rolle spielen sollte. Die großen Mengen Wasserstoff müssten irgendwie transportiert werden. Eine Möglichkeit wären wärmeisolierte Rohrleitungen, durch die flüssiger Wasserstoff bei Temperaturen unterhalb seines Siedepunkts von 20 Kelvin gepumpt wird. Diese Rohre könnten zugleich als Kühlsystem für verlustfrei leitende Stromkabel aus MgB_2 fungieren. Wenngleich ein solches System zurzeit eher nach Sciencefiction klingt, gibt es bereits Vorschläge für Machbarkeitsstudien.

Nach der Entdeckung des ersten Kupferoxid-Supraleiters fanden Forscher Unmengen anderer supraleitender Kupferoxid-Varianten. Beim MgB_2 hingegen sieht es anders aus: In den vier Jahren seit seiner Entdeckung als Supraleiter konnten keine verwandten Verbindungen mit ähnlich hohen T_c-Werten gefunden werden. Die Entdeckung der Supraleitung in den Kupferoxiden glich der Entdeckung eines neuen Kontinents (wo weites Terrain zu erkunden war). Die Entdeckung der Supraleitung in MgB_2 hingegen ähnelt eher der einer entlegenen Insel eines wohlerforschten Archipels. Wir wissen derzeit nicht, ob MgB_2 das letzte Glied in dieser Kette ist oder ob uns noch weitere Überraschungen erwarten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Paul C. Canfield (oben) und **Sergey L. Bud'ko** forschen am Ames-Laboratorium des US-Energieministeriums in Iowa. Canfield ist außerdem als Professor für Physik und Astronomie an der Iowa State University tätig. Beide erforschen die Eigenschaften neuer Materialien.

Magnesium Diboride: better late than never. Von Paul C. Canfield und George W. Crabtree in: Physics today, Bd. 56, Heft 3, S. 34, März 2003

Superconductivity in MgB_2: electrons, phonons, and vortices. Von Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud'ko und Paul C. Canfield (Hg.) in: Physica C, Bd. 385, Heft 1-2, März 2003

Magnesium Diboride: one year on. Von Paul C. Canfield und Sergey L. Bud'ko in: Physics World, Bd. 15, Heft 1, S. 29, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Brownsche Bewegung
Heute und vor 100 Jahren

Im Jahr 1905 diskutierten die Wissenschaftler noch immer, ob Materie aus Atomen und Molekülen bestehe. Albert Einstein trug nicht nur dazu bei, die Vorstellung vom molekularen Aufbau der Körper zu festigen, sondern gab auch dem Gebiet der statistischen Physik neuen Auftrieb.

Von Georg Wolschin

Ganz im Gegensatz zu Einsteins berühmten Arbeiten über die Spezielle Relativitätstheorie sind zwei andere, ebenfalls im Jahr 1905 fertig gestellte Manuskripte in der Öffentlichkeit weniger bekannt. Dennoch gehören auch sie zu den wegweisenden Publikationen, mit denen der am Berner Patentamt angestellte »Experte dritter Klasse« die weitere Entwicklung der Physik befruchtete.

Beide Veröffentlichungen behandeln die so genannte brownsche Bewegung. Damit bezeichnen die Wissenschaftler die scheinbar regellose Zitterbewegung von in Flüssigkeiten suspendierten makroskopischen Teilchen. Deren Zickzackdrift wird – wie Einstein vermutete – durch die thermische Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle hervorgerufen, die mit den Partikeln zusammenstoßen.

Einstein ebnete mit diesen Arbeiten den Weg für den experimentellen Nachweis der Flüssigkeitsmoleküle, die wegen ihrer geringen Größe selbst nicht sichtbar sind. Tatsächlich konnte der französische Physikochemiker Jean Baptiste Perrin (1870–1942) im Jahr 1908 auf diese Weise bestätigen, dass die Materie aus Atomen aufgebaut ist – unter anderem für jene Arbeit erhielt er 1926 den Physik-Nobelpreis. Einstein hatte diese Ehrung bereits fünf Jahre zuvor erhalten – allerdings nicht für die Arbeiten zur brownschen Bewegung oder zur Relativitätstheorie, sondern für die Erklärung des Fotoeffekts.

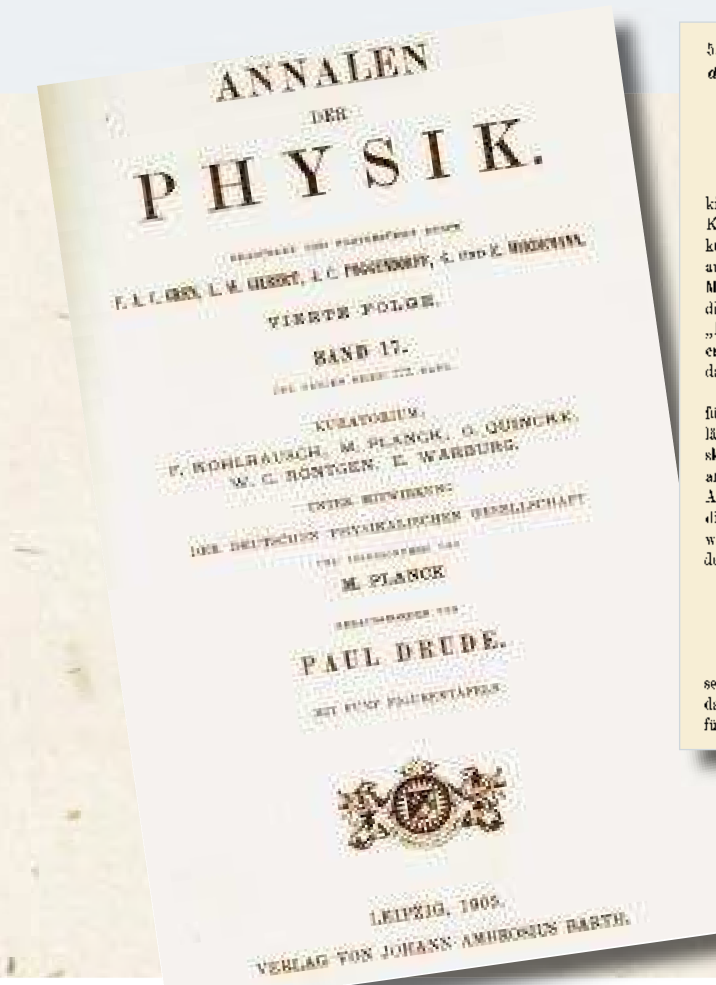
Das Phänomen der brownschen Bewegung war damals schon seit Langem bekannt – doch fehlte noch die richtige theoretische Interpretation. Benannt ist es nach dem schottischen Botaniker Robert Brown (1773–1858), auf den auch die erste klare Beschreibung des Zellkerns zurückgeht und der entscheidend dazu beitrug, aus der Botanik eine wissenschaftliche Disziplin zu machen. Als Brown im Sommer 1827 Blütenpollen in einem Wassertropfen unter dem Mikroskop untersuchte, fiel ihm auf, dass sich die Pollen in ständiger zittriger Bewegung befanden, die weder aufhörte noch gedämpft wurde. Äußere Einflüsse wie etwa Licht konnte er als Ursache ausschließen.

Zunächst versuchte Brown, seine Entdeckung als Eigenschaft von lebenden Substanzen zu erklären. Doch der Botaniker fand auch für suspendierte Körner von anorganischen Mineralien die gleiche Zitterbewegung. Demnach musste es sich um einen physikalischen und nicht um einen biologischen Effekt handeln.

Es vergingen Jahrzehnte, in denen die grundlegende Bedeutung des Phänomens weit gehend unerkannt blieb. Eines der größten Rätsel war, dass die Zitterbewegung nicht zum Erliegen kam. Was führte den suspendierten Partikeln unablässig Energie zu?

Am 18. Juli 1905 schließlich erschien Einsteins Arbeit mit dem Titel »Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen« in den »Annalen der Physik«. Gleich im ersten Absatz schrieb er: »Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten ›Brownschen Molekularbewegung‹ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.« Aus diesem Grund fehlt auch der Hinweis auf die brownsche Bewegung im Titel der Arbeit.

Inzwischen ist längst klar, dass die Diffusionstheorie, die Einstein in dieser Publikation vorlegte, auf die brownsche



ANNALEN
DER
PHYSIK.

F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

KURATORIUM:
F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE,
W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

M. PLANCK

PAUL DRUDE.

LEIPZIG, 1905.
VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;*
von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownschen Molekularbewegung" identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwiese sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben.

§ 1. Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden osmotischen Druck.

Im Teilvolumen V^* einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen V seien z-Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen V^* durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-

EIN STEIN JAHR 2005

Im Mai 1905 erschien in den »Annalen der Physik« Einsteins Aufsatz, in dem er die brownsche Molekularbewegung theoretisch begründete.

Molekularbewegung anwendbar ist. Es gelang ihm, eine theoretische Herleitung des Diffusionskoeffizienten zu geben und die (heute Einstein-Relation genannte) Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Temperatur abzuleiten.

Die Bedeutung der Einstein'schen Arbeiten über die brownsche Molekularbewegung für die moderne Wissenschaft ist enorm. Nicht nur in der Physik und in angewandten Bereichen wie der Nanotechnologie, sondern auch in Biologie und Chemie ist Einsteins Theorie der Diffusion sehr wichtig, und diese Originalarbeiten werden heute viel öfter zitiert als diejenigen über den Fotoeffekt oder die spezielle Relativität.

Das folgende Interview mit dem Physiker Siegfried Großmann von der Universität Marburg soll Entstehungsgeschichte, Inhalt und Wirkung der Einstein'schen Arbeiten zur brownschen Molekularbewegung im Hinblick auf die moderne Forschung beleuchten. ◁



AUTOR

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg Physik und ist freier Wissenschaftsjournalist.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Großmann, wie kam Einstein dazu, sich mit der brownschen Bewegung zu befassen?

Siegfried Großmann: Der molekulare Aufbau der Materie war um 1900 ein leidenschaftlich diskutiertes Thema der Forschung. Es war die Zeit des gedanklichen, vielleicht auch emotionalen Übergangs von der klassischen zur atomistisch geprägten modernen Physik. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass auch der junge Albert Einstein, der 1905 gerade 26 Jahre alt war, sich mit der »molekularkinetischen« Physik auseinander setzte.

Großen Einfluss auf Einstein hatten die Arbeiten von Ludwig Boltzmann, Max Planck und Robert Kirchhoff über die kinetische Gastheorie und die Thermodynamik. Seine Dissertation schrieb er über die molekularkinetische Analyse von Lösungen. Darin gelang es ihm, die Begriffe der klassischen Hydrodynamik und der Diffusionstheorie zusammenzubringen. Im Juli 1905 reichte er die Dissertation an der Universität Zürich ein; eine überarbeitete Fassung erschien im Februar 1906 in den »Annalen der Physik«.

Spektrum: Dann ist die 1905 vorgelegte Diffusionstheorie ein Produkt von Einsteins Doktorarbeit?

Großmann: Ja, die 1905er Arbeit über suspendierte Körper, über die wir uns hier unterhalten, ist ganz wesentlich aus Einsteins Dissertation erwachsen, in denen er Lösungen behandelte. Eine weitere Anschlussarbeit, die ebenfalls im Februar 1906 in den »Annalen der Physik« erschien, ergänzte sie unter dem Titel »Zur Theorie der Brownschen Bewegung«. Einstein hielt nunmehr also für gesichert, dass seine Diffusionstheorie die seit Langem bekannte brownsche Bewegung beschrieb.

Spektrum: Was war denn das grundlegend Neue an seiner Diffusionstheorie?

Großmann: Einstein gründete seine Analyse nicht wie seine Vorgänger auf den Gleichverteilungssatz der Energie über alle Freiheitsgrade, sondern auf den makroskopisch messbaren osmotischen Druck der suspendierten »Körperchen«. Auch studierte er nicht deren Geschwindigkeit, die sich ja unter den Stößen der umgebenden Flüssigkeitsmoleküle ständig ändert, sondern vielmehr die mittlere Verschiebung der Körperchen durch die statistisch erfolgenden Molekülstöße. Er behandelte also eine ganz andere, eine neue und richtig gewählte Größe, die messbar sein sollte und unter dem da- ▷


ROLF K. WEGST / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Siegfried Großmann ist emeritierter Universitätsprofessor für Theoretische Physik an der Philipps-Universität Marburg. Zu seinen Arbeitsgebieten gehören unter anderem die statistische Physik realer Gase und Fluide und die nichtlineare Dynamik komplexer Systeme.

mals neu entwickelten Ultramikroskop dann auch gemessen werden konnte.

Neu war aber auch, die Kenngrößen der Diffusionsbewegung mit der inneren Zähigkeit der Flüssigkeit zu verknüpfen. Diese ist ja der bremsende Gegenspieler der Bewegung, in welche die Partikel durch die Stöße geraten.

Spektrum: Stand denn Einstein mit der Entwicklung seiner Diffusionstheorie in der Forschung ähnlich singulär da wie mit seiner Relativitätstheorie?

Großmann: Nicht ganz. Der Theoretiker Marian von Smoluchowski, der an den Universitäten Lemberg und Krakau lehrte, hat die Beschreibung der brownschen Molekularbewegung mit Hilfe der mittleren quadratischen Verschiebung unter dem Einfluss der Molekülstöße unabhängig entwickelt und 1907 veröffentlicht. Auch Ludwig Boltzmann hatte in seiner Gastheorie gesagt, dass die thermische Bewegung der Moleküle zu einer messbaren Verschiebung der Körperchen führen sollte.

Spektrum: Apropos »messbar« – wie ließ sich Einsteins Theorie bestätigen? Reichten die bisherigen Beobachtungen der Zitterbewegungen aus, oder machte er auch Vorhersagen, die experimentell überprüft werden konnten?

Großmann: Einstein gelang es, die Physik von suspendierten Körpern, also gewissermaßen Übermolekülen, quantitativ und experimentell nachprüfbar zu beschreiben. Auf eine Bewährung seiner Formeln in Experimenten legte er außerordentlichen Wert! Sie war Teil seiner Motivation zu dieser Arbeit.

So sagt er einleitend, dass nach der klassischen Theorie der Thermodynamik nicht zu erwarten sei, dass suspendierte Teilchen auf die Gefäßwände irgendeine Kraft ausübten. Aber, und nun folgt O-Ton Einstein, »vom Standpunkt der molekularkinetischen Wärmetheorie kommt man zu einer ganz anderen Auffassung … Die suspendierten Körper üben einen osmotischen Druck aus« – wie gelöste Moleküle auch. Denn, so seine wichtige Einsicht, gelöste Moleküle und suspendierte Körper unterscheiden sich »lediglich durch die Größe«. Er berechnet diesen Druck und die Ausbreitung durch Diffusion bei Druckgefälle und schließt mit den Worten »Möge es bald einem Forscher gelingen, die hier aufgeworfene, für die Theorie der Wärme wichtige Frage zu entscheiden.«

Spektrum: Und dieser Forscher, dem es gelang, war Perrin?

Großmann: Ja. Der Franzose Jean Baptiste Perrin hat mit seinen Experimenten die Einstein'schen Ergebnisse und Vorhersagen über die Diffusion schon 1908 glänzend bestätigt.

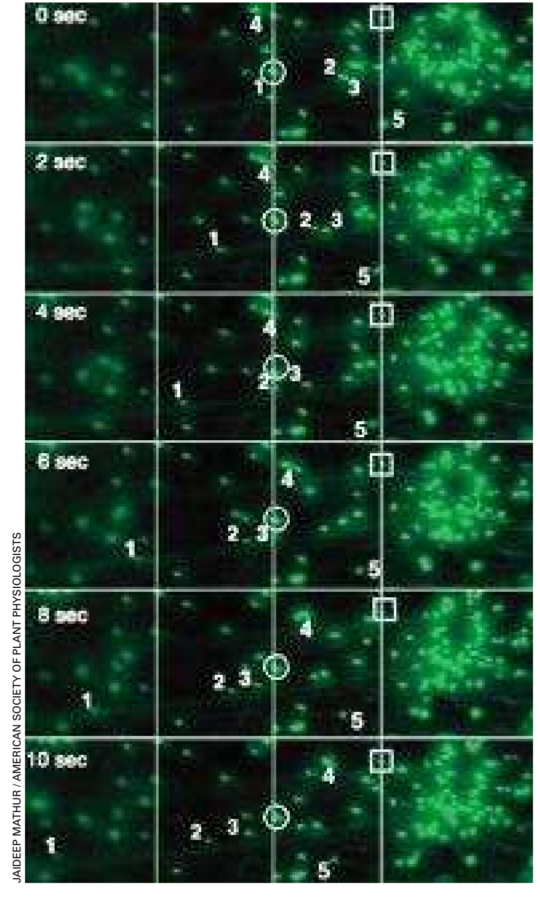
Spektrum: Wie haben Einsteins Zeitgenossen die Diffusionstheorie denn aufgenommen? Gab es vor der experimentellen Bestätigung auch Kritik?

Großmann: Es gab schon das eine oder andere Verständnisproblem. So vermutete Wilhelm Conrad Röntgen in einem Brief, den er im September 1906 an Einstein schrieb, dass die brownsche Bewegung im Widerspruch zum Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik stünde, nach dem irreversible Prozesse in einem abgeschlossenen System mit einer Vergrößerung der Entropie einhergehen. Ähnliches hatte auch schon der hoch angesehene Henri Poincaré geäußert.

Einstein werden sich solche Zweifel aber gar nicht gestellt haben, weil sich die Bewegung der Konstituenten, also der Flüssigkeitsmoleküle und der suspendierten Körper, nicht unterscheiden. Der Zweite Hauptsatz beansprucht Gültigkeit für die Statistik von großen Systemen oder von solchen mit vielen Freiheitsgraden, aber nicht für die Schwerpunktsbewegung einzelner Teilchen. Letztere gehorcht der reversiblen newtonschen Mechanik, während der Zweite Hauptsatz über die Entropie die irreversible, nicht zeitumkehrbare Vielteilchendynamik betrifft. Beide kommen sich nicht nur nicht ins Gehege, sondern sie vertragen sich nach heutiger Einsicht wunderbar. Einstein ist übrigens auf Röntgens Brief nie explizit eingegangen.

Spektrum: Anfang des 20. Jahrhunderts wurde noch immer diskutiert, ob Atome und Moleküle »reale« Teilchen seien. Welchen Einfluss hatten Einsteins Arbeiten in dieser Hinsicht?

Großmann: Sie haben wesentlich zum Bewusstseinswandel über die molekulare Struktur der physikalischen Körper beige-



JAIDEEP MATHUR / AMERICAN SOCIETY OF PLANT PHYSIOLOGISTS

Auch bläschenförmige Strukturen im Cytoplasma lebender Zellen unterliegen der brownschen Bewegung. Von den hier in Zwei-Sekunden-Intervallen fotografierten Peroxisomen zeigen zwei eine solche Zitterbewegung (Kreis und Quadrat), während sich die mit den Ziffern 1 bis 5 markierten aktiv bewegen.

tragen – seien sie nun fest, flüssig oder gasförmig. Da Einsteins Aussagen, die sich aus der Vorstellungen der Molekularkinetik ergaben, durch Messungen nachprüfbar waren, erwiesen sie und damit die Moleküle sich als in demselben Sinne real wie andere Vorstellungen der Physik, zum Beispiel elektrische oder magnetische Felder, Ladungen, Lichtquanten und vieles andere mehr.

Einstein war hinsichtlich des molekularen Aufbaus der Materie zwar ein Rufer neben anderen, etwa Ludwig Boltzmann, trug aber wesentlich zum endgültigen Durchbruch bei. Er überzeugte schließlich selbst die großen, aber einflussreichen Skeptiker wie Ernst Mach und Wilhelm Ostwald. In der Atomdebatte bewirkte Einstein die durchgreifende Änderung des Bewusstseins, indem er die Analysemethode wesentlich erweiterte und neue, experimentell prüfbare Verknüpfungen herstellte. In den anderen beiden großen Arbeiten von 1905 zur Relativitätstheorie und zum Fotoeffekt änderte er hingegen Grundvorstellungen der Physik.

Spektrum: Gibt es ein zentrales Ergebnis der Diffusionstheorie, das über die Erklärung der brownschen Bewegung hinausreicht?

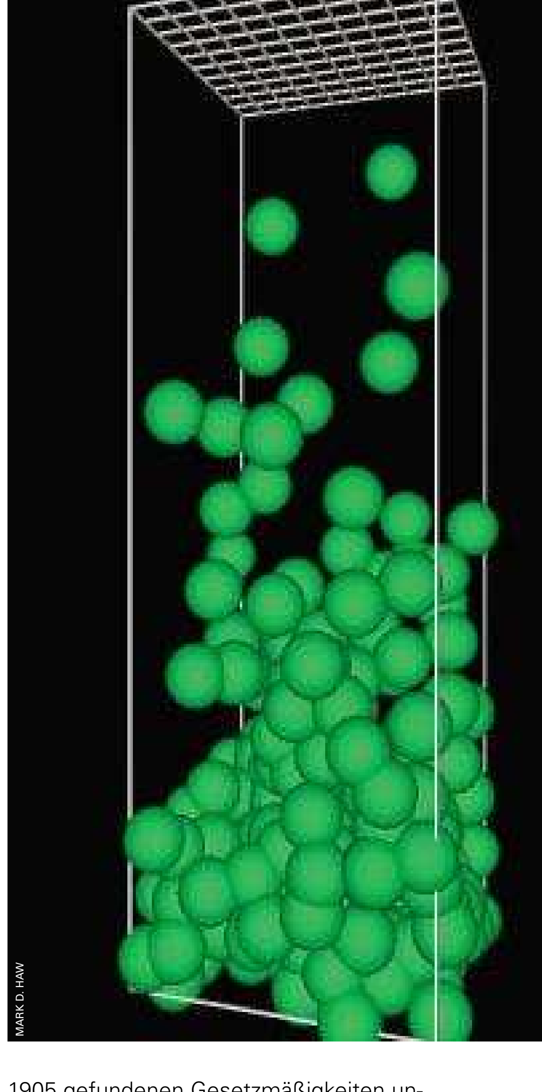
Großmann: Zunächst einmal Einsteins Einsicht, dass im molekularkinetischen Bereich generell die Gesetze der Statistik und Wahrscheinlichkeitsverteilungen anzuwenden sind.

Spektrum: Und weiter?

Großmann: Die molekularkinetische Theorie und die makroskopische Wärmetheorie wurden vereinheitlicht. Die bis dahin nur für verdünnte Systeme, also Gase, geltende Kinetik konnte nun Aussagen machen, die auch für kondensierte Systeme, also für Flüssigkeiten, gelten, bei denen die teilnehmenden Moleküle, seien sie winzig oder riesengroß, beliebig stark und andauernd miteinander interagieren. Einsteins Trick war, messbare Größen unter verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten und so Verknüpfungen zwischen ihnen herzustellen. Das liefert explizite Formeln, die man nachmessen kann. Solche Zusammenhänge nennen wir heute »Einstein-Relationen«.

Spektrum: Wo spielen solche Relationen eine Rolle?

Großmann: Etwa bei den Zusammenhängen zwischen Gleichgewichtsschwankungen einerseits und der Reaktion eines Systems auf äußere Störungen andererseits. Sie bilden heute einen zentralen Baustein für die Untersuchung vieler Systeme aus Physik, Chemie, Biologie, Neurologie, weicher Materie, Verkehrsforschung, Rauschgrenzen für Messgeräte, Bewegung von Viren oder Wirkstoffen und so weiter.



In Flüssigkeit suspendierte Partikel (grün in dieser Computersimulation) verhalten sich wie große Moleküle. Wegen der Schwerkraft nimmt ihre Konzentration exponentiell mit der Höhe ab.

Spektrum: Welche Gebiete in der heutigen naturwissenschaftlichen Forschung profitieren Ihrer Meinung nach am meisten von den 1905er Arbeiten?

Großmann: Das kann man wohl so nicht beantworten. Einstein hat mit allen drei großen Arbeiten von 1905 die Entwicklung der Physik wesentlich beeinflusst und geprägt. Seine Ergebnisse sind uns heute so selbstverständlich, dass man sich oft gar nicht klar darüber ist, wann und wo man sie überall verwendet. Auch werden die forschenden Wissenschaftler je nach ihrem Interessengebiet unterschiedliche Antworten geben wollen. Besonders die jeweils junge Generation lernt die Physik nach Einsteins Einsichten, ohne sich bewusst zu sein, dass es so ist.

Spektrum: Wieso werden Einsteins Arbeiten über die brownsche Molekularbewegung heute von anderen Wissenschaftlern häufiger zitiert als diejenigen über die Spezielle Relativitätstheorie und den Fotoeffekt – für die Einstein in der Öffentlichkeit doch weit bekannter ist?

Großmann: Das hängt vielleicht damit zusammen, dass die moderne Wissenschaft sehr interdisziplinär geworden ist. Moleküldynamik wendet man heute auch in der Biophysik, der Molekularbiologie, der Biochemie und so weiter an. Das sind Gebiete, in denen die molekularkinetischen Grundlagen für die meisten beobachteten Phänomene besonders wichtig sind. Es sind einfach mehr Wissensgebiete und deshalb mehr Wissenschaftler, die auf Einsteins Suspensionsarbeit, auf seine Analyse brownscher Bewegung oder auf seine Einsichten zur Statistik von Schwankungen zurückgreifen. Zellen des menschlichen Körpers oder die von Tieren und Pflanzen bestehen aus vielen, ganz unterschiedlich großen Molekülen. Alle zeigen sie Diffusion, alle zeigen andauernde thermische Bewegung, hydrodynamische Viskosität. Sie sind also den Einstein'schen, 1905 gefundenen Gesetzmäßigkeiten unterworfen – seine diesbezüglichen Arbeiten müssen also auch zitiert werden.

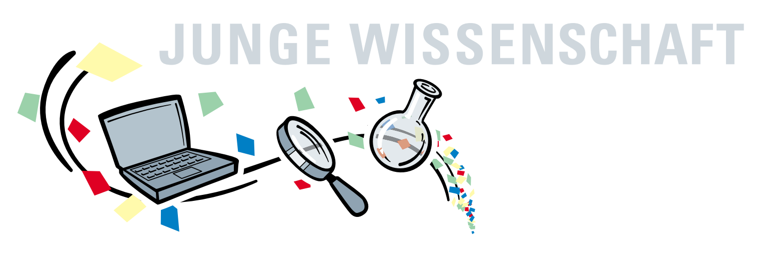
Spektrum: Und woran liegt es nun, dass die brownsche Bewegung nicht mit der Zeit aufhört?

Großmann: Weil sie Teil und Indikator der ewigen atomaren Wärmebewegung ist. »Wärme« ist ja nichts anderes als Bewegungsenergie der Moleküle, wie klein oder groß sie auch sein mögen. Die thermische Energie eines jeden Moleküls ist gleich, weil sie alle miteinander in Kontakt stehen. Die Geschwindigkeit eines Moleküls ist zwar umso kleiner, je größer seine Masse ist, aber Bewegung ist stets vorhanden. Alles stößt sich gegenseitig. Kühlt man ab, geht alles gemächlicher zu. Aber so wenig man den absoluten Nullpunkt erreichen kann, so wenig kann man die Bewegung anhalten! Bei endlicher Temperatur bewegt sich alles immer, hört also nie auf. ◁

AUTOREN

Die Fragen stellten **Uwe Reichert**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft, und **Georg Wolschin**.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

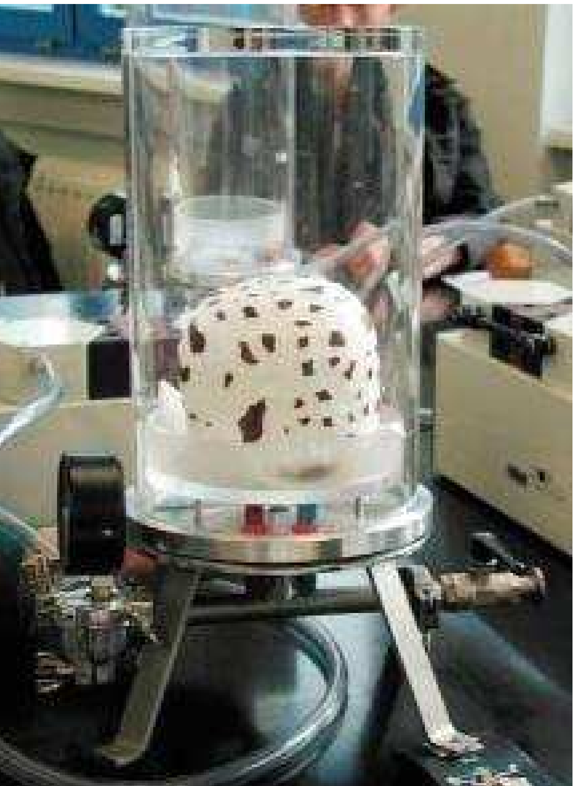


Forschen wie in der echten Wissenschaft

Eine bunte Vielfalt von Schülerlaboren jeder Größe und Ausrichtung bietet Kindern und Jugendlichen von der Grundschule bis zum Abitur Gelegenheit, Experimente zu Fragen aus der aktuellen Forschung mit professionellem Gerät durchzuführen.



XLAB GÖTTINGEN



PHYSIK.BEGREIFEN@DESY.DE

Laserschutzbrillen sind bei den entsprechenden Experimenten im XLAB in Göttingen vorgeschrieben (oben); bei »physik.begreifen@desy.de« bläht sich ein Schokokuss im Vakuum zu imposanter Größe auf (unten).

Von Katrin Engeln

Die Krankheit ist nicht neu, die Therapie aber schon. Naturwissenschaften, vornehmlich Physik und Chemie, gelten bei Schülern und vor allem Schülerinnen als langweilig, uninteressant und schwer. Entsprechend schlecht sind die Leistungen, wie die jüngsten internationalen Bildungsvergleichsstudien mit ihren ernüchternden deutschen Ergebnissen drastisch bestätigt haben. Als Antwort darauf sind in den letzten Jahren Schülerlabore wie Pilze aus dem Boden geschossen.

Inzwischen hat sich eine ganze Schülerlabor-Szene in Deutschland etabliert. Industrie, Universitäten und Forschungseinrichtungen haben die Initiative ergriffen und auf ihrem eigenen Gelände Labore eingerichtet, in denen Schülerinnen und Schüler Experimente selbsttätig durchführen können. Oft sind die Experimentierplätze mit Apparaturen ausgestattet, die auch in der aktuellen Forschung verwendet werden und in den Schulen nicht zur Verfügung stehen.

Im Idealfall gleicht das angebotene Experiment den im Hause praktizierten Forschungsarbeiten und vermittelt den Jungforschern damit einen authentischen und nachhaltigen Einblick in die Arbeit des Wissenschaftlers. Außerdem ist es vom Thema her unmittelbar interessant und so schwer, dass die Teilnehmer vor einer echten Herausforderung stehen, die zumeist Kooperation erfordert. Bei einem großen Teil der Schülerlabore dürfen die Teilnehmer auch ein echtes Forschungslabor besichtigen.

Bunte Mischung für alle Altersklassen

In der Regel bietet ein einzelnes Labor nur ein sehr begrenztes Sortiment an Experimenten an und wendet sich an eine einzige Klassenstufe, vor allem aus der gymnasialen Mittel- und Oberstufe. Über die ganze Szene hinweg ist jedoch das Angebot sehr vielfältig und deckt das gesamte Spektrum von der ersten Klasse bis zum 13. Jahrgang ab. Unter den biologischen Experimenten sind Gentechnologie und Mikrobiologie auffällig stark vertreten.

Eine Schulklasse besucht ein Labor innerhalb des regulären Unterrichts, einer Projektwoche oder auch einer Klassenfahrt, für einen Tag, mehrere Tage am Stück oder verteilt über das ganze Schuljahr. Daneben bieten viele Schülerlabore auch Programme für spezielle Zielgruppen wie besonders Interessierte und Hochbegabte oder auch eigens für Mädchen an.

Einige Schülerlabore sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

▶ Das **Lübecker offene Labor (Lola)** der Universität Lübeck wendet sich mit Gentechnik und molekularer Biotechnologie vor allem an die Oberstufe. Unter anderem kann man dort DNA-Abschnitte vom Neandertaler mit denen vom Menschen vergleichen und so Rückschlüsse auf deren Abstammung ziehen.

Schülerlabore

Ungeachtet ihrer unterschiedlichen Entstehungsgeschichte und Ausrichtung stimmen die Schülerlabore in ihren Zielsetzungen überein. Es geht ihnen darum,

- das Interesse an den Naturwissenschaften zu fördern,
- Tätigkeitsfelder und Berufsbilder im naturwissenschaftlichen Bereich vorzustellen,
- die Bedeutung von Naturwissenschaft für unsere Gesellschaft aufzuzeigen und
- ein zeitgemäßes Bild von Naturwissenschaften und Technik zu vermitteln.

Umfassende Informationen über die Schülerlabor-Szene und konkrete Angaben über fast 250 Labore finden sich unter www.lernort-labor.de, der Homepage des BMBF-Projekts »Lernort Labor«. Ziel dieses Projekts ist es, die Schülerlabore in ihrer Entwicklung zu fördern, ihr Wirkungspotenzial zu verstärken und ihre langfristige Etablierung im Bildungssystem zu unterstützen.

Die Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren hat eine Broschüre herausgebracht, in der alle Schülerlabore der Mitgliedsinstitute aufgeführt sind.

Die Robert Bosch Stiftung fördert mit dem Programm NaT-Working (www.bosch-stiftung.de/natworking/) zahlreiche außerschulische Initiativen im naturwissenschaftlich-technischen Bereich.

▶ Der **Kubus** des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle GmbH in Leipzig bietet Versuche zur Immunmodulation, zu Schadstoffen in Grundwasser und Luft sowie Biotests an. So kann man beim Fischei-Entwicklungs-Biotest den Einfluss von Schadstoffen, darunter Alkohol, auf die Entwicklung von Eiern des Zebrabärblings untersuchen.

▶ Im **Teutolab Chemie** der Universität Bielefeld sind chemische, am Alltag orientierte Versuche für alle Altersklassen in den Themenreihen »Naturstoffe«, »Produktionschemie« und »Energie und Umwelt« zusammengefasst. Typisches Beispiel für die erste Themenreihe ist die Gewinnung von Orangenöl aus Orangenschalen durch Wasserdampfdestillation für die Klassenstufen 10 und 11.

▶ Einen ähnlichen Themenschwerpunkt hat **Chemie zum Anfassen**, betrieben von der Fachhochschule Merseburg und dem Verein »Sachzeugen der Chemischen Industrie«, der sich der Förderung von Technikgeschichte und Kultur der mitteldeutschen Chemieregion verschrieben hat. Zur Auswahl stehen mehr als 500 Experimente in 36 verschiedenen Experimentierreihen, zum Beispiel Chemie in Bad und Küche, Oberflächengewässer, Kosmetik und Chromatografie. Für die Experimente der Reihe Oberflächengewässer bringen die Achtklässler eigene Wasserproben mit, von denen sie den pH-Wert, die Leitfähigkeit oder auch den Sauerstoffgehalt bestimmen.

▶ Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg bietet in seinen Schülerlaboren Versuche zum Vakuum mit einem eindrucksvollen Knalleffekt zum Schluss – Schokokuss im Vakuum (Bild links) – sowie zur Radioaktivität: Dort können Neunt- und Zehntklässler mit echten radioaktiven Präparaten arbeiten und die Wirkung verschiedener Abschirmungen untersuchen. Der Name **physik.begreifen@desy.de** ist identisch mit der Internet-Adresse.

▶ Im Schülerlabor **Quantensprung**, in dem es insbesondere um Stromerzeugung geht, macht das GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht einen seiner Forschungsgegenstände zum zentralen Thema: die Brennstoffzelle, mitsamt Vermessung der Kennlinie und Untersuchung des Einflusses der Gaszufuhr.

▶ Das **DLR School Lab Göttingen** des Deutschen Forschungszentrums für Luft- und Raumfahrt hat für Schüler der Mittel- und Oberstufe sieben verschiedene Experimente aus den Themenbereichen Kräfte, Strömungen, Wirbel, Schwingungen und Messtechnik im Programm. Besonders eindrucksvoll ist ein etwa 20 mal 80 Zentimeter großer, kontinuierlich herabfließender Seifenfilm, der von einem Flügelprofil oder einem anderen Modellkörper genauso in seiner Bewegung gestört wird wie die Luft von einem echten Flugzeug. Variationen in der Strömungsgeschwindigkeit des Seifenfilms bewirken Veränderungen der Filmdicke, die ihrerseits durch optische Interferenz in schillernden Farben sichtbar gemacht werden (Bild oben rechts). ▷


DLR SCHOOL LAB GÖTTINGEN


TEUTOLAB CHEMIE, UNIVERSITÄT BIELEFELD

Der Seifenfilm im DLR School Lab Göttingen zeigt die variierenden Geschwindigkeiten, mit denen er ein Hindernis umströmt (oben). In der »Picasso-Bar« des Teutolab malen die Kinder mit selbst hergestellten Quarkfarben (unten).







Am XLAB in Göttingen wird ein Gehirn seziert.

XLAB GÖTTINGEN

▷ Weitere Schülerlabore betreibt das DLR in Berlin-Adlershof, Hamburg, Köln-Porz, Oberpfaffenhofen und Stuttgart-Lampoldshausen.

▶ Die größten Schülerlabore überhaupt sind eng mit Universitäten verbunden: das **Alfried-Krupp-Schülerlabor** in Bochum und das **XLAB** in Göttingen. Beide wenden sich an die Mittel- und vor allem die Oberstufe, decken das gesamte Spektrum der Naturwissenschaften ab und haben ausreichend Kapazität, mehrere Klassen gleichzeitig zu betreuen.

▶ Am anderen Ende der Größenskala gibt es viele kleinere Labore, die von dem Engagement einzelner Personen leben, sich auf Kooperationen mit ausgewählten Schulen beschränken und eher im Verborgenen wirken.

Besuch mit Spätwirkung

In einer empirischen Untersuchung konnte ich zeigen, inwieweit und auf welche Weise Schülerlabore ihre erklärten Ziele (Kasten S. 71) tatsächlich erreichen. Ich befragte mittels Fragebogen ganze Schulklassen, die einen einmaligen Besuch in den Laboren DLR School Lab Göttingen, Quantensprung, Teutolab und physik.begreifen@desy.de (Vakuum und Radioaktivität) absolvierten, und zwar einmal unmittelbar im Anschluss an den Besuch und nochmals etwa drei Monate danach während des regulären Unterrichts.

Bei der Auswertung der Antworten konnte ich die Bewertung des Laborbesuchs durch die Teilnehmer in drei Komponenten aufgliedern: die emotionale (»Wie viel Spaß hat mir die Labortätigkeit gemacht?«), die wertbezogene (»Wie wichtig war der Besuch für mich?«) und die epistemische (»Wie sehr hat der Besuch meine Wissbegier geweckt?«). Dabei traten in keiner der drei Komponenten nennenswerte geschlechtsspezifische Unterschiede zu Tage. Offenbar gelingt den Schülerlaboren, was im herkömmlichen Schulunterricht vielfach scheitert: Mädchen und Jungen gleichermaßen anzusprechen. Eine genauere Analyse deutet darauf hin, dass die annähernd gleich positive Bewertung der Schülerlabore je nach Geschlecht durchaus auf unterschiedlichen Wegen zu Stande kommt: Jungen begeistern sich eher für das Material und die Ausstattung der Labore, Mädchen eher für die Selbsttätigkeit beim Experimentieren, den Wissenserwerb und die Zusammenarbeit.

Überraschenderweise beurteilen die Schüler ihren Laborbesuch aus dem zeitlichen Abstand von einem Vierteljahr noch deutlich positiver als unmittelbar danach, und das, obgleich in den meisten Fällen im Unterricht keine Nachbereitung stattgefunden hat. Offensichtlich wirkt das Erlebnis nach und verändert im Effekt die Sichtweisen der Jugendlichen. Angesichts der Wirkungslosigkeit vieler schulischer Bemühungen zur Förderung des Interesses an Naturwissenschaften stimmt dieser Befund durchaus optimistisch.

Die Jugendlichen waren von dem Laborbesuch regelmäßig dann besonders angetan, wenn die – aus den Antworten errechneten – Variablen »kognitive Herausforderung« und »wahrgenommene Authentizität« hohe Werte aufwiesen. Dieser Befund lässt sich unmittelbar in eine Empfehlung umsetzen, der zu folgen den Schülerlaboren wegen ihrer engen Anbindung an Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie nicht schwer fallen wird: Man bemühe sich, einen Bezug zur aktuellen Forschung herzustellen. Dadurch sind die zu bearbeitenden Aufgaben automatisch nicht nur »echt«, sondern meistens auch »echt hart«, eine intellektuelle Nuss, die es zu knacken lohnt.

Ein weiterer Befund kann nicht wirklich überraschen: Je höher ein Teilnehmer die »Verständlichkeit« der Veranstaltung einschätzte, desto fähiger fühlte er sich, die Herausforderung zu bewältigen, und desto beglückter war er, weil ihm das gelang. Das gilt besonders für diejenigen, denen die Naturwissenschaften eigentlich zuwider sind und die deshalb solche Erfolgserlebnisse nur selten zu verzeichnen haben.

Treffend bringt ein Schüler auf den Punkt, was er durch den Besuch des Schülerlabors gelernt hat: »dass Experimentieren Spaß bringt, mir zeigt, wie Forschung wirklich funktioniert, und dass Experimentieren anstrengend ist.«◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Katrin Engeln ist Diplomphysikerin und Studienrätin für die Fächer Mathematik und Physik. Sie arbeitet gegenwärtig im Projekt »Lernort Labor« am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften der Universität Kiel.

Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken. Von Katrin Engeln. Logos, Berlin 2004

Nah dran – Die Helmholtz-Schülerlabore. Von der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (Hg.), Bonn 2004. Bestellung oder Download unter http://www.helmholtz.de/de/Publikationen.html

Brücken zur Wissenschaft – Empfehlungen zur Verstetigung der Zusammenarbeit von Schulen und Hochschulen. Vom Stifterverband für die deutsche Wissenschaft und der Robert Bosch Stiftung (Hg.), 2005. Download unter www.bosch-stiftung.de/download/ bruecken_zur_wissenschaft.pdf

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Nicht rostender Badeanzug

»Die amerikanische Firma ›Dobeckmun‹ brachte unter der Bezeichnung LUREX einen Badeanzug für Damen aus Metallgarn heraus. Die Grundlage dieses metallischen ›Garns‹ ist mit einem durchsichtigen Kunststoffilm überzogen, der das Rosten verhindert. Mit Hilfe dieses neuartigen Materials, das nicht nur zur Herstellung von Badeanzügen benutzt werden kann, lassen sich interessante Farb- und Lichteffekte an Bekleidungsstücken erzielen.« *(Deutsche Erfinderpost, 7. Jg., Nr. 6, S. 11, 1955)*

Älteste Dauersiedlung entdeckt

»Östlich von Mossul in der Nähe der persischen Grenze wurde eine kleine prähistorische Ansiedlung entdeckt, die aus der Zeit vor 5000 vor Christus stammt und als die älteste bisher bekannte menschliche Dauersiedlung angesprochen wird. Die Bewohner hatten noch keine Sicheln und kein irdenes Geschirr, obgleich sie Figuren aus Ton formten. An Geräten fand man Feuersteinwerkzeuge, Steinmörser mit Stößel, Reibsteine und Äxte.« *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 8. Jg., Heft 6, S. 239, Juni 1955)*

Element 101 getauft

»Vor etwa zwei Monaten konnten Nobelpreisträger Glenn Seaborg und Mitarbeiter an der University of California das Element 101 isolieren und identifizieren. Es ist schwerer als Plutonium oder natürlich vorkommendes Uran, überdies stark radioaktiv, eignet sich aber infolge seiner nur sehr kurzen Lebensdauer nicht für die Gewinnung von Atomenergie. Ihm wurde die Bezeichnung Mendelevium gegeben.« *(Chemiker-Zeitung, 79. Jg., Nr. 11, S. 377, Juni 1955)*

Mehr Licht fürs Fernsehen

»Die neuen Riesenglühlampen … haben eine Stromaufnahme von 20000 Watt … Die bisherige 10000 W-Serienlampe liefert einen Lichtstrom vom etwa 300000 lm. Die neuen 20 kW-Lampen dürften mindestens den doppelten Lichtstrom ausstrahlen, was dem Licht von ungefähr 430 normalen 100 W-Lampen gleichkäme … Die neuen Riesenglühlampen sollen Film- und Fernsehstudios ausleuchten sowie zum Aufhellen bei Außenaufnahmen dienen.« *(Die Umschau, 55. Jg., Heft 12, S. 362, Juni 1955)*



Neben einer 40-W-Glühbirne wirkt die neue 20-kW-Lampe riesig.



Mit der Vielfachnadel halten die Patienten die »Prickelung« meist auch ohne Narkose aus.



Japanische Insel verschwindet

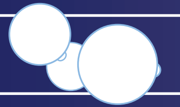
»Die Insel Nuschima, die vor einigen Monaten in der Nähe der Küste von Japan aus dem Meere entstand, verschwindet mit beinahe ebenso großer Geschwindigkeit wie sie gekommen ist. Die japanische Regierung sandte einen Gelehrten dorthin, … und dieser berichtete, daß die höchste Stelle der Insel nunmehr nur noch zehn Fuß aus dem Wasser herausreiche … Man nimmt an, daß die junge Insel in einigen Wochen wieder vollständig verschwunden sein wird.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 146, S. 560, Juni 1905)*

Abhilfe bei »Roten Nasen«

»Eine höchst lästige Form bleibender Gefässerweiterungen ist die ›rote Nase‹ … Die erschlafften Venenwände entbehren der erforderlichen Elastizität. Sie nehmen immer grössere Blut-Quantitäten auf … und müssen zerstört werden. Der Dermatologe Lassar hat zu dem Zweck einen kleinen Apparat konstruiert. Ein … Elektromotor treibt einen hammerartigen Apparat, an dessen Ende ein Bündel von etwa vierzig feinen vergoldeten Platinspitzen befestigt ist. Diese ›Vielfachnadel‹ … bringt die voher gesäuberte Haut während weniger Minuten zu reichlicher Blutung … Acht Sitzungen genügen meist, um selbst kupferrote und Purpurnasen ohne jede Spur oder Narbe glatt und für immer zur normalen Farbe zurückzubringen.« *(Die Umschau, 9. Jg., Nr. 26, S. 517, Juni 1905)*

Die Psychologie der Regenwürmer

»Bei seinen bekannten Untersuchungen … hatte Darwin unter anderem beobachtet, dass die Regenwürmer beim Hineinziehen von Gegenständen in ihre Röhren stets sehr zweckmäßig verfahren. Lindenblätter wurden stets bei der Spitze, Rhododendronblätter am Grunde ergriffen … Zunächst konnte Frl. E. Hanel die Richtigkeit der Darwinschen Angaben … bestätigen. Unverletzte Lindenblätter wurden stets mit der Spitze voran eingezogen … auch, wenn ihm durch Wegschneiden der seitlichen Teile die Gestalt eines Rhododendronblattes gegeben wurde … So vermutet Frl. Hanel die Einwirkung chemischer Reize … Aus Papier gefertigte Blätter, die in Gestalt und Zähnelung den natürlichen glichen, wurden stets bei der Spitze ergriffen.« *(Die Umschau, 9. Jg., Nr. 25, S. 494, Juni 1905)*



Weichen stellen für den Wasserstoff

Der Treibhauseffekt und das drohende Ende des billigen Erdöls stehen ganz oben auf der Agenda der Europäischen Union. Und so gerät Wasserstoff als Energieträger zum Hoffnungsträger, denn bei der Verbrennung dieses allgegenwärtigen Elements entsteht lediglich Wasser. Kritiker halten den Wasserstoffboom für eine Geldvernichtungsmaschine: Eine globale Wasserstoffwirtschaft käme derzeit zu teuer und sei überdies ökologisch fragwürdig. Doch wenn die Weichen nicht jetzt gestellt werden, wann sonst?

Ein entschiedenes Jein

Für die einen ist Wasserstoff die Lösung aller Energieprobleme, für die anderen reine Energieverschwendung. Die Wahrheit lautet: Es ist eine Frage der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen.

Von Bernd Müller

»Ich glaube, dass eines Tages Wasserstoff und Sauerstoff, aus denen sich Wasser zusammensetzt, … eine unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht bilden werden.«
Jules Verne, Die geheimnisvolle Insel, 1874

Die Zukunft des Straßenverkehrs vor historischer Kulisse: Vor dem Brüsseler Cinquantenaire Arch posierten anlässlich einer Tagung in diesem Jahr im Vordergrund der Scooter des Forschungszentrums Jülich, in der mittleren Reihe die PKWs (von links nach rechts) F-Cell (DaimlerChrysler), HyMotion (VW) und Hydrogen3 (General Motors), dahinter schließlich die Brennstoffzellen-Busse von MAN und DaimlerChrysler (Citaro).

Die Vision von Jules Verne scheint heute zum Greifen nah. Wasserstoff, chemisch mit dem Buchstaben H bezeichnet, ist nach menschlichen Maßstäben unbegrenzt verfügbar: Das bekannte Universum besteht zu 75 Prozent aus dem leichtesten aller chemischen Elemente. Auch unter Umweltaspekten ist das Gas mustergültig: Bei seiner Umwandlung in Brennstoffzellen oder in Verbrennungsmotoren fällt im Wesentlichen nur Wasser an. Eine Energiewirtschaft, die den Brennstoff aus regenerativen Quellen wie Wind-, Wasser- oder Sonnenenergie erzeugt, würde viele der heutigen Probleme lösen: vom Treibhauseffekt bis zur Versorgungssicherheit.

So weit die Theorie. Kritiker bezeichnen eine Wasserstoffwirtschaft als Energieverschwendung, die Ausgaben für Forschung und Entwicklung sowie für den Aufbau einer Infrastruktur wären ihres Erachtens anderswo sinnvoller investiert. Helmut Geipel vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit wettert: »Wasserstoff ist leichter als Luft und führt dazu, dass die Leute die Bodenhaftung verlieren … Das Gas ist ungiftig, verwirrt aber die menschlichen Sinne.« Dagegen proklamiert der US-Bestsellerautor Jeremy Rifkin pathetisch: »Die Umstellung auf Wasserstoff ist die beste Versicherung gegen künftige Ölkriege im Nahen Osten.«

Entdeckt wurde Wasserstoff 1766 vom englischen Chemiker Henry Cavendish. Sein französischer Kollege Antoine Lavoisier taufte das scheue Gas, das im Periodensystem der Elemente heute an erster Stelle steht, etwa zwanzig Jahre später »hydrogène«, was vom griechischen *hydro* (Wasser) und *genes* (erzeugend) abgeleitet ist. Wasserstoff bildet aber nicht nur Wasser, sondern steckt in unzähligen anderen chemischen Verbindungen, zum Beispiel in Kohlenwasserstoffen. Als molekularer Wasserstoff kommt es natürlich praktisch nicht vor.

Damit ist eine gravierende Einschränkung schon genannt: Wasserstoff ist kein Primärenergieträger wie Öl, Kohle, Erdgas oder wie die Sonne. Um ihn zu nutzen, muss man ihn erst einmal herstellen – und das kostet Energie.

Universalgenie Wasserstoff

Was Kritiker als Nachteil empfinden, preisen die Befürworter. Denn als Sekundärenergieträger lässt sich Wasserstoff aus beliebigen Primärenergien erzeugen, zum Beispiel aus Erdgas reformieren (derzeit der gängigste Weg), aus Kohle oder Öl abspalten oder mit überschüssigem Strom in der Elektrolyse aus Wasser erzeugen. Und: Wasserstoff lässt sich speichern – ein großer Vorteil gegenüber Strom, der nur in geringen Mengen in Batterien zu bevorraten ist.

Die Skepsis der Kritiker beruht denn auch weniger auf technischen Hindernissen – die sind zum großen Teil überwunden –, sondern in erster Linie auf den politischen und wirtschaftlichen Randbedingungen, die nicht so einfach vorhersehbar sind.

Bremse und gleichzeitig Motivation sind die begrenzten Ressourcen fossiler Energieträger. Wie lange Öl, Kohle und Erdgas zur Verfügung stehen, darüber wird heftig gestritten. Nach heutigen Erkenntnissen ist beim Öl in diesem Jahr- ▷

Wasserstoff aus der Leitung



LINDE AG

▲ **Eine der ersten Wasserstofftankstellen steht am Flughafen München. Der Treibstoff wird von Linde Gas & Engineering in Ingolstadt produziert, in Container gefüllt und angeliefert.**

Wie kommt der Sprit zur Tankstelle? Bei Benzin und Diesel ist die Antwort einfach: Tanklastzüge fahren den Treibstoff von Raffinerien selbst zu solchen Tankstellen, die in den abgelegensten Dörfern stehen. Wasserstoff bietet eigentlich mehr Möglichkeiten, weil er sich überall dort herstellen lässt, wo die Sonne scheint oder der Wind weht oder wo überschüssiger Strom zur Verfügung steht.

Dennoch wird H_2 für eine Übergangszeit in gleicher Weise angeliefert, auch wenn einige Tankstellen bereits mit kleinen Dampfreformern arbeiten, die aus Erdgas Wasserstoff für Druckgastanks erzeugen. Flüssiger Wasserstoff, der bei –253 Grad Celsius in isolierten Tanks gespeichert wird und die erste Wahl für Autos ist, lässt sich ohnehin nicht in kleinen, dezentralen Anlagen produzieren.

In Regionen, wo große Mengen des Gases zentral hergestellt werden, kann Wasserstoff auch über Pipelines verteilt werden. Die Linde AG betreibt im Raum Bitterfeld das größte derartige Netz in Deutschland. Seine Gesamtlänge: 395 Kilometer. Auch in bestehende Erdgasnetze könnte Wasserstoff zugemischt werden – einzelne Gasversorger haben bereits erfolgreich Tests abgeschlossen. Neue Erdgasnetze lassen sich bei geringen Mehrkosten so ausrüsten, dass sie auch zum alleinigen Transport von Wasserstoff geeignet sind. Neu ist die Idee nicht: An manchen Orten enthielt das früher verwendete Stadtgas bis zu siebzig Prozent Wasserstoff.

Das EU-Projekt HyWays kommt zu dem Ergebnis, dass die Beimischung von Wasserstoff in Erdgasnetze ein wichtiger Baustein für die schnelle Verbreitung von Wasserstoff sein wird. Eine reine Wasserstoffinfrastruktur wird als Keimzelle bestehende Pipelines der Industrie nutzen und ausweiten.

▷ hundert Schluss, schon in wenigen Jahrzehnten könnte es zur Neige gehen, zumindest zu heutigen Preisen. Es gibt pessimistische Schätzungen, die schon in wenigen Jahren drastische Einschränkungen kommen sehen. Allein in China ist die Nachfrage im letzten Jahr um dreißig Prozent gestiegen. Und wenn China denselben Automobilisierungsgrad erreichen würde wie viele der westlichen Industrienationen, so verdoppelte sich die Anzahl an PKWs weltweit von 800 Millionen auf 1,6 Milliarden. Der Verteilungskampf hat auch in Deutschland bereits begonnen: Die Lufthansa fordert bei Ölknappheit Treibstoffkontingente für den Luftverkehr.

Hilfe vom Ökominator

Bei 25 Dollar pro Barrel Rohöl ist Wasserstoff aus Erdgasreformierung zwar derzeit mehr als viermal so teuer (bezogen auf die Antriebsenergie an den Rädern eines Autos), doch mit dem knapper werdenden Erdöl dürfte sich das ändern. Preisspitzen in den letzten Monaten lagen schon bei 50 Dollar pro Barrel und mehr, während des Iran-Irak-Kriegs Ende der 1970er Jahre erreichten sie sogar 80 Dollar. Hinzu kommt ein politischer Aspekt: Die Erdölvorräte in Europa und in den USA gehen zur Neige, die Abhängigkeit von den Förderländern des krisengeschüttelten Mittleren Ostens ist schon wieder so stark wie vor den beiden Ölkrisen in den 1970er und 1980er Jahren. Erdgas aus anderen Ländern, zum Beispiel Russland, bietet langfristig keine Lösung. Es wird zwar voraussichtlich bis zum Ende des Jahrhunderts vorhanden sein, als Ersatzenergieträger dürften Verbrauch und Preise aber auch beim Gas drastisch ansteigen, wenn das Öl zur Neige geht.

Die USA haben das erkannt und forcieren den Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft – mit viel Tamtam. Gallionsfigur ist der kalifornische Gouverneur Arnold Schwarzenegger. Der »Ökominator«, wie der Ex-Hollywoodstar neuerdings genannt wird, will in seinem Bundesstaat eine lückenlose Infrastruktur aus Wasserstofftankstellen aufbauen. Auch in Europa hat H_2 prominente Befürworter. »Mit zwei Dingen möchte ich in Erinnerung bleiben«, erklärte EU-Kommissionspräsident Romano Prodi bei seinem Abschied, »mit der Osterweiterung und der Wasserstoffenergie.« Prodi präsentier-

te 2003 das Langzeitprogramm »European Hydrogen and Fuel Cell Technology Partnership«. Im sechsten Forschungsrahmenprogramm sind dafür 600 Millionen Euro bis 2006 vorgesehen.

Trotz derartiger Bekundungen hat die Innovationsfreude in Europa aber deutlich nachgelassen – das zeigen die Patentzahlen zu Wasserstofftechnologien. Zwar liegt die Union bei Technologien zur Wasserstofferzeugung noch gut im Rennen, bei der Entwicklung und Herstellung von Brennstoffzellen ist Europa dagegen ins Hintertreffen geraten. Zudem fehlt eine gemeinsame Vision für die europäische Wasserstoffwirtschaft. Immerhin melden deutsche Firmen und Forscher innerhalb Europas immer noch mit Abstand die meisten Patente an, doch mit einem deutlichen Einbruch in den letzten vier Jahren.

Um dem negativen Trend gegenzusteuern hat die EU-Kommission einen bunten Strauß von Projekten aufgelegt, die klangvolle Namen wie HyWays oder HySociety tragen und mit hohen Fördersummen ausgestattet sind. HySociety, an dem zwanzig europäische Forschungspartner beteiligt sind, untersucht, welche Hürden den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bremsen. Das Ergebnis verblüfft: Es sind weniger technische Barrieren, sondern die unklare Finanzierung der Infrastruktur, fehlende gesetzliche Regelungen und technische Normen. Zu wenig Aufmerksamkeit werde der Akzeptanz in der Bevölkerung gewidmet. Wasserstoff gilt zwar als besonders umweltfreundlich, allerdings gibt es Bedenken bezüglich der Sicherheit.

Das Projekt HyWays mit rund dreißig Partnern läuft seit April 2004 und hat ein Gesamtbudget von 7,9 Millionen Euro für drei Jahre. HyWays gibt einen realistischen Anteil von Wasserstoff am Energiemix in den Jahren 2020, 2030 und 2050 vor und errechnet daraus die Folgen für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Im Zentrum des Interesses stehen zwei so genannte Pfade, die den Weg zu diesen Szenarien beschreiben. Im optimistischen rechnen die Forscher für das Jahr 2020 in den Niederlanden mit 3,3 Prozent Wasserstoffautos. Der pessimistische Pfad sieht nur 0,7 Prozent der Fahrzeuge vor. Ähnliche Resultate liegen aus anderen EU-Staaten vor. HyWays kommt zu dem Ergebnis, dass der eigentliche Wasserstoffboom erst ▷

Wasserstoff – ein Sicherheitsrisiko?

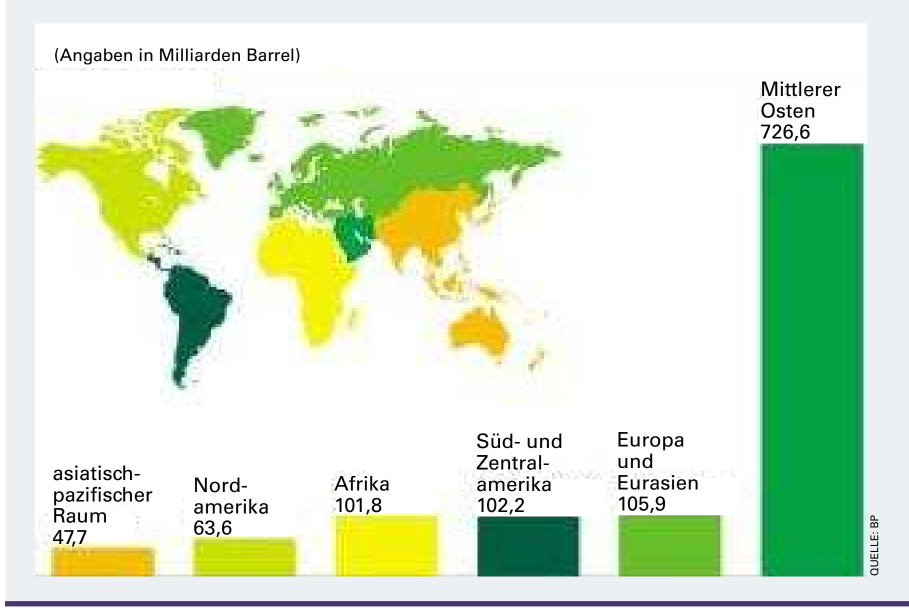
Wer sich an die Knallgasexplosion im Schulunterreicht erinnert, an den spektakulären Brand des Zeppelins Hindenburg oder an die Explosion des Raumschiffs Challenger, bekommt vielleicht ein mulmiges Gefühl, wenn er an das leichte und geruchlose Gas denkt. Dabei war der Wasserstoff gar nicht die Ursache der genannten Katastrophen. Dennoch sprechen die Fakten zunächst gegen das Gas als Brennstoff: Gemische aus Wasserstoff und Luft sind brennbar und in einem weiten Konzentrationsverhältnis von 4 bis 75 Volumenprozent auch explosiv. Die minimale Zündenergie, zum Beispiel aus einem Funken, ist mit 0,02 Millijoule sehr gering und beträgt nur ein Zehntel der Energie, die zum Beispiel ein Erdgas-Luft-Gemisch entzündet.

Doch Wasserstoff hat auch viele gute Eigenschaften. Es ist zum Beispiel ungiftig – im Gegensatz zu Benzin. Und eine Wasserstoffflamme brennt farblos und nahezu unsichtbar, strahlt also kaum Hitze ab, an der man sich verbrennen kann. Die Zündtemperatur liegt mit 585 Grad Celsius deutlich höher als bei Benzin und Diesel (etwa 220 Grad), die schon an heißen Motorteilen Feuer fangen können. Hartnäckig hält sich die Behauptung, Wasserstoff diffundiere besonders schnell, selbst durch dickste Stahlwände. Für heute verwendete Materialien trifft dies nicht mehr zu.

Brandversuche am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologien in Pfinztal haben ergeben, dass ein Leck in einem Wasserstofftank weniger verheerend ist als ein Leck in einem Benzintank. Brennendes Benzin bildet ein Flammenmeer, das sich kaum löschen lässt. Strömt dagegen Wasserstoff aus und entzündet sich, gibt es eine eng begrenzte Flamme, die sofort aufhört, wenn man die Gaszufuhr unterbindet. Zu einer Explosion kommt es auf keinen Fall. Wenn in Industrieanlagen Wasserstoff ausströmt, stellt die Feuerwehr die Anlage ab und lässt den Brand in der Regel einfach weiterlodern.

Gesicherte Erdölreserven (Stand: Ende 2003)

Man mag darüber streiten, wie lange die Ölreserven noch reichen, doch eines ist sicher: Die Abhängigkeit Europas und der USA von den politisch instabilen Ländern des Mittleren Ostens wird wieder zunehmen, denn die Reserven vor der eigenen Haustür sind bereits weit gehend ausgeschöpft.



nach 2020 einsetzen dürfte. 2030 könnten schon 23,7 Prozent Wasserstoffautos fahren (die pessimistische Schätzung: 7,5 Prozent), 2050 dann fast 90 Prozent (pessimistisch: knapp 48 Prozent).

Wasserstoff lässt sich derzeit am einfachsten und wirtschaftlichsten aus Erdgas herstellen. Bei 950 Grad Celsius wird das Erdgas in einem Dampfreformer mit Wasserdampf vermischt und in ein wasserstoffreiches Gas mit hohem Kohlenmonoxid-Anteil überführt. In einem katalytischen Prozess entsteht aus Kohlenmonoxid mit Wasserdampf Kohlendioxid und weiterer Wasserstoff. Die Dampfreformierung erreicht einen Wirkungsgrad von bis zu 80 Prozent. Große Reformer in Industrieanlagen liefern 100 000 Normkubikmeter Wasserstoff pro Stunde. Dieser wird zum Beispiel zur Herstellung von Nylon, Ammoniak für Düngemittel und vielen weiteren Chemikalien verwendet.

Alles bleibt erst einmal besser

HyWays prognostiziert, dass Wasserstoff auch noch nach 2030 weiter auf diese Weise erzeugt wird – zunächst zentral über große Dampfreformer, ab 2020 dann vor allem in kleinen, dezentralen Anlagen. Um dennoch die Ziele zur Reduktion von Treibhausgasen zu erreichen, sollen ab 2020 Verfahren zur Vergasung von Biomasse oder Kohle mit Kohlendioxidabscheidung an Bedeutung gewinnen.

Letztere Variante wird in dem EU-Projekt Hypogen verfolgt. Dabei wird untersucht, wie sich großtechnisch aus fossilen Brennstoffen gleichzeitig Strom und Wasserstoff gewinnen lassen. Das Klimagas Kohlendioxid soll abgetrennt und in unterirdischen Speichern gebunkert werden. Die Technologien sind längst vorhanden, ob sie in der Bevölkerung Akzeptanz finden, ist dagegen noch unklar.

Wenn über Wasserstoff als Energieträger diskutiert wird, dann meist als Treibstoff für Fahrzeuge. Doch Peter Radgen, Energieexperte vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung in Karlsruhe, konstatiert: »Die Automobilhersteller sagen, es gebe zu wenig Wasserstofftankstellen, die Tankstellenbetreiber wollen keine Wasserstoffzapfsäulen bauen, weil es keine Autos gibt.« Der zweite Deutsche Wasserstofftag, der im Februar in Berlin stattfand, könnte hier eine Wende gebracht haben. Wolfgang Reitzle, Vorstandsvorsitzender der Linde AG, verkündete eine Initiative, bei der sein Unternehmen entlang den Autobahnen von München über Stuttgart, Köln, Berlin und wieder zurück nach München alle fünfzig Kilometer eine Wasserstofftankstelle einrichten wolle. Für die rund vierzig Zapfsäulen veranschlagt das Wiesbadener Unternehmen etwa dreißig Millionen Euro Investitionskosten.

Hinter vorgehaltener Hand hört man, dass die Automobilindustrie dem Linde-Vorstoß mit gemischten Gefühlen gegenübersteht, weil er sie unter Zugzwang bringt. Das Konzept der »Wasserstoffkorridore« entlang von Autobahnen ist auch bei den großen Mineralölkonzernen umstritten. Sie beschäftigen sich zwar mit dem Thema, weil sie irgendwann einen Rückgang des Geschäfts mit Benzin und Diesel befürchten, gehen aber davon aus, dass zuerst Ballungsräume mit Tankstellen versorgt werden sollten. Thierry Pflimlin, Geschäftsführer der Total Deutschland GmbH, sieht die Notwendigkeit von Wasserstoffkorridoren erst für die Zeit um 2010. Bis dahin solle in wenigen Großprojekten die Alltagstauglichkeit getestet werden. »Zehn Tankstellen bringen mehr als hundert, wenn diese nur

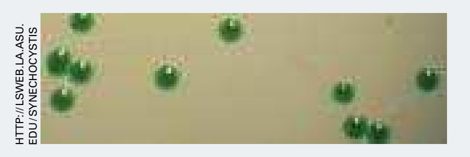


Sie sind Thermoskannen der Superlative: LH_2-Kryotanks (rechts) bestehen aus doppelwandigen Metallbehältern; der Raum zwischen den Schalen ist evakuiert und zudem mit Lagen aus Glasvlies thermisch isoliert. Damit lässt sich Wasserstoff über längere Zeit bei –253 Grad Celsius speichern. Eine Heizung und Ventile sorgen für die geregelte Gasabgabe. Auch der Tankvorgang (oben) wirft keine technischen Probleme mehr auf.

Algen im Tank

Eine große, wenn auch ferne Hoffnung der Wasserstoffbefürworter ist die Erzeugung des Gases mit Bakterien und Mikroalgen. Frei lebende Organismen produzieren jedes Jahr rund 200 Millionen Tonnen Wasserstoff, der aber sofort wieder von Einzellern in der Umgebung aufgenommen wird. Dass Grünalgen und Cyanobakterien bei Belichtung mittels Photosynthese Wasserstoff erzeugen, ist schon länger bekannt. Vermutlich schützen Grünalgen und Cyanobakterien so ihre Photosynthesemaschine vor zu viel Licht, indem sie gewissermaßen »Dampf ablassen« – in diesem Fall Wasserstoff.

Rüdiger Schulz-Friedrich von der Universität Kiel kultiviert solche Mikroalgen und versucht, die Ausbeute zu erhöhen. Aus einem Reaktor von der Größe einer Milchflasche sprudeln derzeit nur etwa zwei bis drei Milliliter Wasserstoff pro Stunde – ein Vielfaches hält der Wissenschaftler durch physiologische und gentechnische Veränderung für möglich. Dann könnten im Meer Farmen entstehen, wo Mikroalgen in Schläuchen gezüchtet werden und der Wasserstoff geerntet wird. Eine US-Firma hat allerdings bereits versucht, eine solche Biowasserstoffproduktion kommerziell umzusetzen – und ging Pleite: zu geringe Ausbeute bei zu hohen Kosten. Doch Schulz-Friedrich glaubt an die technische Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit bis in zehn oder zwanzig Jahren.



HTTP://LSWEB.LA.ASU.EDU/SYNECHOCYSTIS

Cyanobakterien wie *Synechocystis* produzieren Wasserstoff im Rahmen der Photosynthese.

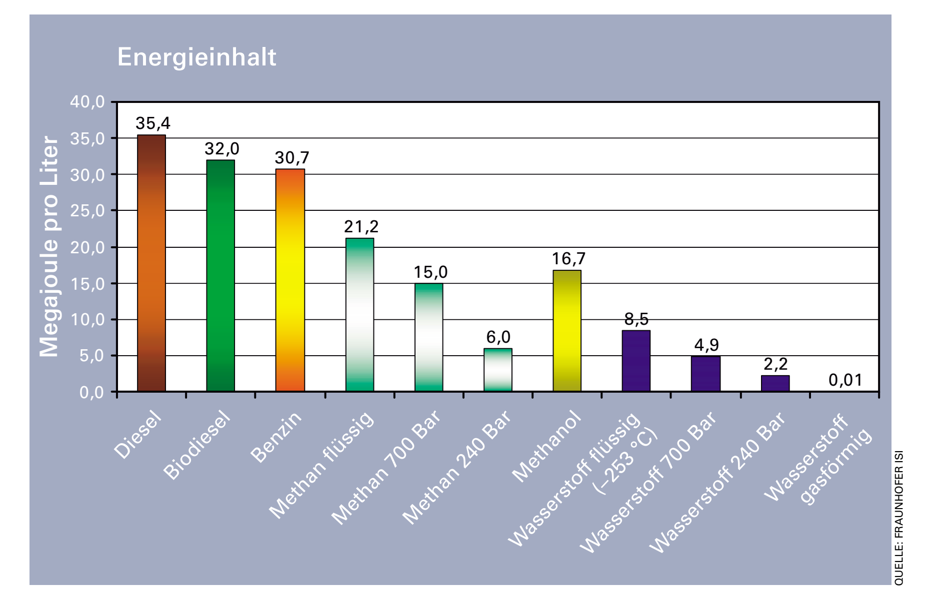
innere Schale
Füllrohr
äußere Schale
Wärme-isolation
elektrische Heizung
Entnahme von flüssigem H_2
Einfüll-stutzen
flüssiges H_2
Entnahme von Wasserstoffgas
Wärmeventile
Wärmetauscher für Kühlwasser
Füllstandsensor
Sicherheitsventile

BEIDE BILDER: LINDE AG

von wenigen Fahrzeugen benutzt werden«, so Pflimlin. Erst bei hundert Fahrzeugen pro Tankstelle könne man wirklich von einem Alltagstest reden. Ab 500 wäre eine Tankstelle wirtschaftlich, sofern der Preis vier bis fünf Euro pro Kilogramm Wasserstoff betrage.

Der Ausstieg aus fossilen Energieträgern und der Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft wird auch von großen ökologischen Hoffnungen geprägt. Um den Kohlendioxidausstoß zu bremsen, sind alternative Energieträger gefragt – doch hier bringt Wasserstoff erst einmal keine Entlastung. Auch wenn eine Brennstoffzelle vor allem Wasser ausstößt, das Emissionsproblem wird lediglich verlagert. Denn fast die Hälfte der heute weltweit jährlich 600 Milliarden Normkubikmeter Wasserstoff werden in der oben beschriebenen Weise aus Erdgas erzeugt, noch einmal so viel aus Kohle und Öl. Nur wenige Prozent stammen aus der Elektrolyse und wenn der dafür erforderliche Strom nicht aus Sonnen-, Wind- oder Wasserkraft stammt, ist aus ökologischer Sicht kaum etwas gewonnen. Von Vorteil wäre nur, dass Emissionen aus den belasteten Innenstädten aufs Land verlagert würden und der Schadstoffausstoß von wenigen großen Kraftwerken leichter zu reduzieren wäre als der von Millionen Autos.

Carl-Jochen Winter, Vizepräsident der International Association for Hydrogen Energy in Überlingen, plädiert dennoch für diesen Weg. »Erneuerbare Energien sind das Ziel, keine Voraussetzung für den Übergang in die Wasserstoffwirt- ▷



Solange das Rohöl reichlich fließt, kommt eine Wasserstoffwirtschaft ohne politische Unterstützung nur schwer in Schwung. Denn der Energieinhalt herkömmlicher Kraftstoffe ist um ein Vielfaches höher, selbst bei einer Verdichtung des Wasserstoffs durch Verflüssigung bei –253 Grad Celsius.

schaft.« Nach Forschung und Entwicklung sei jetzt die Wirtschaft am Zuge, Wasserstoff zu einem Geschäft zu machen, das sich lohne. Winter bringt diese Ansicht werbewirksam auf den Punkt: »It's Hytime!«

Das sieht Ulf Bossel vom European Fuel Cell Forum in Oberrohrdorf in der Schweiz ganz anders. Für ihn ist eine Wasserstoffwirtschaft reine Energieverschwendung. Er pocht darauf, dass allein die Nutzenergie am Ende einer langen Prozesskette aus Herstellung, Transport und Verbrauch darüber entscheidet, welchen Wirkungsgrad ein Energieträger erreicht und wie wirtschaftlich er somit ist. Bossel kommt zu einem vernichtenden Urteil: »Wasserstoff wird voraussichtlich viermal teurer sein als Strom aus der Steckdose.«

Doch seine Berechnungen sind nach Meinung der Befürworter nur Zahlenspielereien, weil die zu Grunde gelegten Szenarien gar nicht zur Diskussion stehen. Niemand denkt ernsthaft darüber nach, den herkömmlichen Energiemix dort auf Wasserstoffbasis zu stellen, wo er heute sauber und billig seinen Dienst verrichtet, zum Beispiel bei der Stromversorgung von Gebäuden. Auch Bossels Forderung, Benzin- und Dieselfahrzeuge durch batteriebetriebene Elektroautos zu ersetzen, muss scheitern. Abgesehen von Konzepten für Hybridautos mit Verbrennungsmotor und Elektromotor, arbeitet kein großer Automobilhersteller heute mehr an einer solchen Technik, denn trotz hoher Entwicklungskosten gelang es keinem, die erforderlichen Akkumulatoren zu bauen: Sie speicherten zu wenig Strom und brauchten zu lange für die Ladung. Gerade hier hat Wasserstoff Vorteile: Er lässt sich innerhalb von wenigen Minuten in einen Tank pressen.

Effizienz allein macht nicht glücklich

Andere Kritiker einer wasserstoffbasierten Mobilität bilanzieren häufig nur die Energie- und Umweltbilanz bis zum PKW-Tank, bei denen H_2 gegenüber Benzin oder Diesel schlecht abschneidet. Die aufwändigere Herstellung, Verflüssigung oder Komprimierung und Verteilung schlucken dreißig und mehr Prozent, wenn Wasserstoff wie heute üblich in Erdgasreformern hergestellt wird. Benzin und Diesel verlieren dagegen in der Raffinerie und beim Transport nur zehn Prozent ihrer Energie.

Diese Verluste holt Wasserstoff in der Brennstoffzelle aber wieder auf. Konventionelle Verbrennungsmotoren in Autos haben vergleichsweise geringe Wirkungsgrade. Nur 20 bis 25 Prozent des eingesetzten Kraftstoffs werden im Durchschnitt als Antriebsenergie genutzt, der größte Teil der Energie verpufft als Wärme. Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle, die chemische Energie eines Brennstoffs in Elektrizität umwandelt, liegt deutlich höher – zurzeit schon bei rund 45 Prozent mit weiteren Steigerungspotenzialen. Für den Kunden und die Umwelt zählt die Gesamtbilanz bezogen auf die Energiedienstleistung, das heißt im Verkehr die gefahrenen Kilometer. Dabei ergibt sich je nach Wasserstoffherstellung und Transport eine vergleichbare Gesamtenergiebilanz zu konventionellen Brennstoffen.

Wirkungsgrade allein machen die Autofahrer nicht glücklich. Für sie ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend. Klimaexperten wiederum interessieren sich für

LINDE AG

Mittelfristig dürfte eine Wasserstoffwirtschaft auf der Dampfreformierung von leichten Kohlenwasserstoffen wie Erdgas aufbauen. Die abgebildete Anlage erzeugt pro Stunde bis zu 100 000 Kubikmeter Wasserstoff. Dazu wird das Erdgas unter hohem Druck und hoher Temperatur in mehreren Schritten in Wasserstoff und leider auch Kohlendioxid umgewandelt.

BEIDE ABBILDUNGEN: LINDE AG

▲ **In der Marine hat die Zukunft schon begonnen: Weil Brennstoffzellen-U-Boote länger unter Wasser bleiben können als solche mit Dieselantrieb, testet die Howaldtswerke Deutsche Werft (HDW) in Kiel die noch kostspielige Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden (links).**

die Menge an Kohlendioxid, die bei den verschiedenen Treibstoffen ausgestoßen wird. Hier ist die Botschaft eindeutig: je sauberer, desto teurer. Vergleicht man zum Beispiel Benzin mit Wasserstoff aus umweltgerechter Kohlevergasung, reduziert sich der Kohlendioxidausstoß pro Kilowattstunde mechanischer Energie etwa auf ein Fünftel, während sich der Preis dabei mindestens verdoppelt. Rechnet man noch die Steuern hinzu, sieht das Verhältnis zwar günstiger aus, trotzdem bleibt Wasserstoff immer die kostspieligere Variante. Martin Wietschel, der am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung in Karlsruhe für HyWays Szenarien zur Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff entwickelt, sieht einen Gleichstand erst dann, wenn Öl 100 bis 120 Dollar pro Barrel kostet.

Wasserstoff ist also für die meisten Industrieländer auf absehbare Zeit unwirtschaftlich und bringt zunächst wenig Entlastung für die Umwelt. Wer ihn als Kraftstoff im Auto ächtet, muss sich aber fragen lassen, was angesichts der in jedem Fall begrenzten Erdölressourcen die Alternativen sind. Denn die Optionen sind begrenzt:

▶ Biodiesel und Biogas könnten zur Minderung des CO_2-Ausstoßes beitragen, doch in Europa begrenzen die möglichen Anbauflächen den Anteil auf maximal 20 Prozent des Bedarfs.

▶ Erdgas hat Vorteile bei den Emissionen, doch auch diese Vorkommen sind beschränkt. Hier bietet sich höchstens eine Alternative für die Übergangszeit.

▶ Strom hat hohe Wirkungsgrade und lässt sich weit gehend emissionsfrei erzeugen. Doch der Einsatz in Autos über wieder aufladbare Batterien scheitert an der mangelnden Reichweite und an der Unwirtschaftlichkeit.

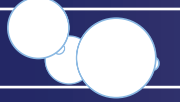
Dass der Traum einer Null-Emissions-Wasserstoffwirtschaft möglich ist, zeigt das Beispiel Island. Die Insel erzeugt schon heute 72 Prozent ihrer Primärenergie aus regenerativen Energiequellen, vor allem aus Wasserkraft und Erdwärme, bei Strom sind es sogar 100 Prozent. Fossile Energien im Straßenverkehr und in der Fischereiflotte sollen künftig durch Wasserstoff ersetzt werden. Rund 100 000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr wären dafür nötig. Der wird aus dem grünen Strom gewonnen, der in Island in Hülle und Fülle zur Verfügung steht. Islands Ministerin für Industrie und Handel Valgerdur Sverrisdottir peilt etwa das Jahr 2020 an. Doch auf einen genauen Termin will sie sich nicht festlegen: »Der Weg ist das Ziel.«

Falls sich eine Energieknappheit in den nächsten Jahren einstellt und Wasserstofftechnologie benötigt wird, muss der Aufbau der Infrastruktur mit politischer Unterstützung jetzt beginnen – wie es Island vormacht. Andernfalls könnten die volkswirtschaftlichen Folgen dramatisch sein, man denke an die vergangenen Ölpreiskrisen. Falls H_2 dank besserer Alternativen vorläufig doch nicht gebraucht wird, hätte man allerdings zunächst Milliarden in den Sand gesetzt. Das ist das Problem: Heute müssen Entscheidungen unter Risiken eingegangen werden, aus denen wohl erst eine kommende Generation Nutzen zieht.





Bernd Müller ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Esslingen. Er hat den ersten Schritt in die Energiezukunft bereits vollzogen: Er fährt ein Erdgasauto.



Prima Klima durch Wasserstoff?

Die globale Erderwärmung und Luftverschmutzung erfordern neue Konzepte der Energieversorgung. Ist Wasserstoff die Lösung oder schafft er gar neue Umweltprobleme?

Von Martin G. Schultz

Eines der wichtigsten Ziele bei dem Umstieg auf eine wasserstoffbasierte Energiewirtschaft ist der Schutz des Erdklimas. Unter Fachleuten ist unstrittig, dass der Ausstoß von Treibhausgasen bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger maßgeblich zur Erwärmung der Erde beigetragen hat, Alternativen sind also dringend gesucht. Die »Verbrennung« von Wasserstoff – zum Beispiel in einer Brennstoffzelle – erfolgt ohne Freisetzung von Kohlendioxid (CO_2) und könnte daher eine solche Lösung sein. Allerdings gibt es dieses Gas in der freien Natur nicht in nutzbarer Form, seine Herstellung erfordert Energie. Vom wirtschaftlichen Aspekt abgesehen stellt sich damit natürlich die Frage, ob dabei womöglich der Teufel mit dem Beelzebub ausgetrieben würde, wie mancher Kritiker behauptet. Welche klimarelevanten Veränderungen bei einer weltweiten Nutzung von Wasserstoff zu erwarten wären, hinge sicherlich stark von der Energieart ab, die zur Erzeugung des Gases verwendet würde.

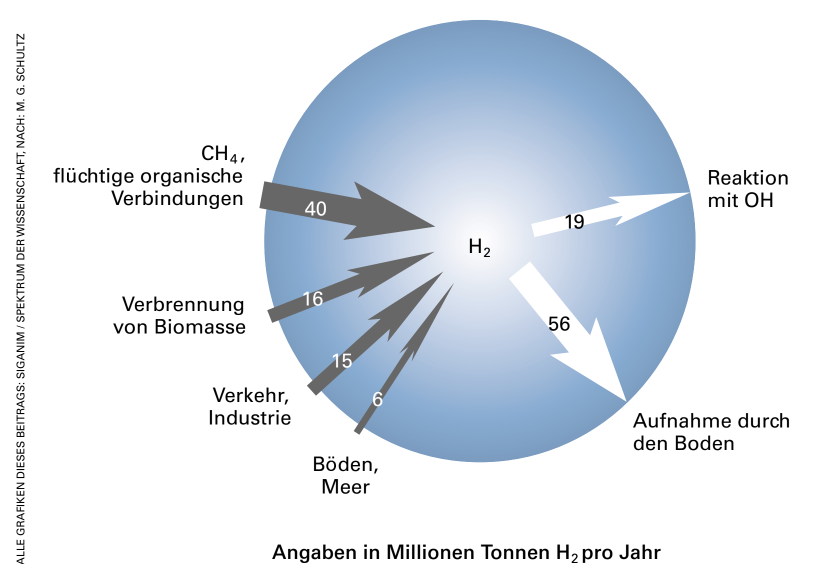
Wir sind am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg diesem Problem nachgegangen. Da die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Einführung einer Wasserstoffwirtschaft noch unbekannt sind, müssen sich solche Studien auf die Entwicklung von Szenarien und auf numerische Simulationen stützen. Unsere Grundannahme war: Weltweit verbrennt der gesamte straßengebundene Verkehr Wasserstoff statt konventioneller Kraftstoffe. Alle anderen Abgase aus der Industrie und den Haushalten sowie natürliche Emissionen blieben in dem Modell gegenüber heute unverändert. Eine weitere wichtige Annahme war, dass der benötigte Wasserstoff ausschließlich aus emissionsfreien Quellen erzeugt würde. Dies ist nicht unbedingt gleichbedeutend mit regenerativen Quellen – bei der Herstellung und Verbrennung von Biokraftstoffen entstehen Kohlenmonoxid (CO), Lachgas (N_2O), Stickoxide (NO_x) sowie Methan (CH_4), während andererseits die nichtregenerative Kernenergie emissionsfrei arbeitet.

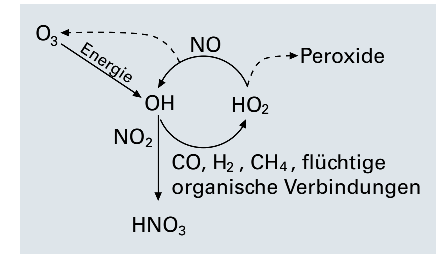
Unter diesen vereinfachenden Annahmen wollten wir klären:

- Wie verändert sich durch weltweite Einführung der Wasserstofftechnologie die Emission von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid und Methan? Was folgt daraus für die Erderwärmung durch den Treibhauseffekt?
- Wie verändert sich die Chemie der Atmosphäre, insbesondere die globale Oxidationskapazität, und welchen Einfluss hat dies auf die Abbaurate von Methan?
- Ändert sich die Luftqualität, insbesondere die Konzentration bodennahen Ozons?
- Erhöht sich die Konzentration von molekularem Wasserstoff in der Atmosphäre? Hat dies spürbare Auswirkungen auf das Klima, die Ozonschicht und die Luftverschmutzung?

Allein durch menschliche Tätigkeit, vor allem durch das Verbrennen fossiler Kraftstoffe und durch Brandrodung, wurde bislang so viel CO_2 freigesetzt, dass die globale Erwärmung um etwas weniger als ein Grad Celsius zugenommen hat. Seit etwa 1850 stieg die mittlere CO_2-Konzentration von etwa 280 ppm *(parts per million)* auf derzeit über 380 ppm. Diese 100 ppm Zuwachs aber hatten bereits denselben Effekt wie eine Zunahme der Sonneneinstrahlung von etwa 1,46 Watt

Wie diese schematische Bilanz der atmosphärischen Wasserstoffmengen zeigt, spielt die Reaktion mit Hydroxylradikalen (OH) eine erhebliche Rolle.





Hydroxylradikale bauen das Treibhausgas Methan in der Atmosphäre ab. Ihre Konzentration hängt von zahlreichen Komponenten ab, vor allem von Ozon (O_3), energiereicher UV-Strahlung, Wasserdampf (H_2O), Stickoxiden (NO, NO_2), Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H_2) und Wasserstoffperoxiden, Methan (CH_4) und anderen Kohlenwasserstoffen sowie Salpetersäure (HNO_3).

pro Quadratmeter. Das ist schon mehr als die natürliche Variation um etwa 1,1 Watt pro Quadratmeter während eines elfjährigen Sonnenzyklus.

Leider würde eine Reduktion der Emissionen diesen Anstieg lediglich verlangsamen, eine Trendumkehr wäre noch nicht die Folge. Ohne zusätzliche Maßnahmen, letztlich ohne eine Null-Emissions-Wirtschaft, lässt sich die Erderwärmung aber sicher nicht aufhalten. Die Vermeidung aller CO_2-Emissionen aus dem Straßenverkehr, wie unser Szenario sie vorsieht, wäre ein solcher Schritt. Sie würde immerhin etwa 20 Prozent der gesamten weltweiten Kohlendioxidfreisetzung einsparen und damit weit über die im Kyoto-Protokoll vereinbarten Verpflichtungen hinausgehen.

Doch wie steht es mit Methan, das etwa dreißigmal so klimawirksam ist wie Kohlendioxid? Zwar erzeugen konventionelle Motoren selbst keine nennenswerten Mengen davon, doch haben sie indirekt einigen Anteil an dem Anstieg der Methankonzentration um 1 ppm im Vergleich zur vorindustriellen Zeit (entsprechend einer hypothetischen Zunahme der Sonneneinstrahlung um fast 0,5 Watt pro Quadratmeter). Die mittlere Lebensdauer dieser chemischen Verbindung in der Atmosphäre beträgt rund neun Jahre und hängt fast ausschließlich von der Konzentration der Hydroxylradikale (OH) ab. Wenn deren Anteil schwindet, wird Methan langsamer abgebaut, und damit steigt – bei gleich bleibender Quellstärke – sein Anteil in der Atmosphäre. Da OH-Radikale sehr reaktionsfreudig sind, wird ihre Konzentration ganz wesentlich durch schnelle Reaktionen von kurzlebigen Spurengasen und der Intensität der UV-Strahlung bestimmt. Eine besondere Rolle spielen dabei Stickoxide, die wie ein Katalysator wirken und OH-Radikale nach deren »Verbrauch« zurückbilden können.

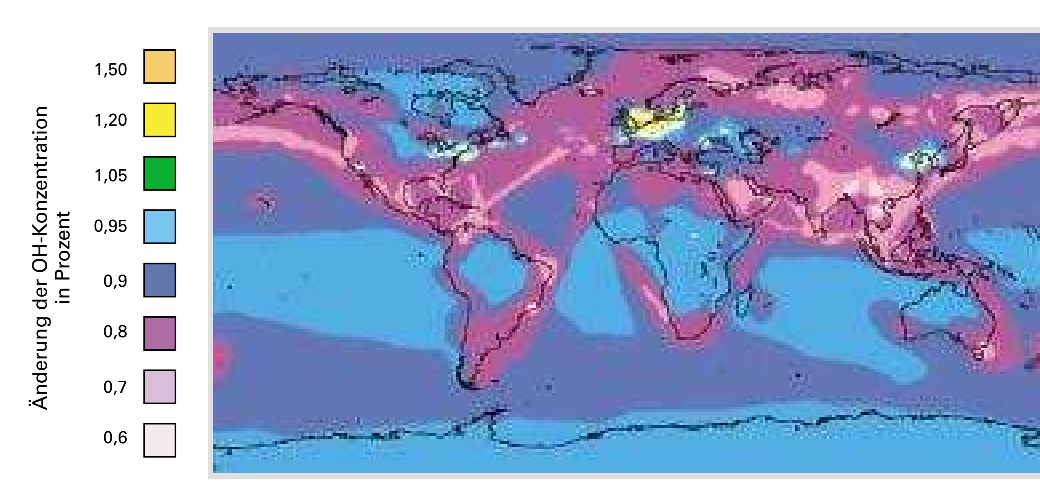
Und damit wären wir wieder bei unserem Szenario: Gegenwärtig trägt der Straßenverkehr erheblich zu den Stickoxidemissionen bei: über 60 Prozent in Europa und etwa 40 Prozent weltweit. Bei ausschließlicher Nutzung von Brennstoffzellen würden diese Emissionen entfallen. Mittelbar nähme die OH-Konzentration ab, was leider einen höheren Anteil an klimarelevantem Methan zur Folge hätte (siehe Grafik unten). Allerdings ist die Atmosphärenchemie äußerst komplex, da sehr viele chemische Reaktionen miteinander verknüpft sind. Deshalb lassen sich die Auswirkungen nur mit aufwändigen numerischen Modellen quantifizieren, die sowohl Transportprozesse wie chemische Reaktionen beschreiben. Die mit unserem Modell berechnete Abnahme der OH-Konzentration betrug rund 5 bis 10 Prozent, die daraus folgende Zunahme der Methankonzentration in der Atmosphäre ergäbe eine hypothetische Verstärkung der Sonneneinstrahlung um etwa 0,06 Watt pro Quadratmeter. Das entspricht ungefähr dem Einfluss, den gegenwärtig die CO_2-Zunahme über drei Jahre ausübt.

Im Gegensatz zum Methan würde der Anteil des troposphärischen Ozons in einer emissionsfreien Wasserstoffwirtschaft abnehmen. Da seine Konzentration stark variiert, ist zu erwarten, dass der ozonbedingte Treibhauseffekt zumindest regional abnimmt und damit der Effekt der Methanzunahme dort kompensiert würde.

Alles in allem dürfte der Klimaeinfluss der Wasserstoffwirtschaft hauptsächlich davon abhängen, wie sich die Kohlendioxidemissionen dadurch ändern werden. Insbesondere in der Übergangszeit wird ein Großteil des Wasserstoffs vermutlich aus Erdgas und anderen kohlenstoffhaltigen Brennstoffen gewonnen oder durch Wasserelektrolyse mit Strom aus konventionellen Kraftwerken produziert werden. Dies würde – bei gleich bleibendem Endenergiebedarf – die CO_2-Emissionen erhöhen. Darum ist es wichtig, gleichzeitig mit der Einführung der Wasserstofftechnologie weiter an Einsparpotenzialen zu arbeiten und möglichst schnell auf regenerativ erzeugten Wasserstoff umzustellen.

Der zweite Nutzen, den sich viele von der neuen Technologie erhoffen, ist eine Verbesserung der Luftqualität. Während Luftverschmutzung und die daraus resultierenden Schäden in früheren Jahrhunderten meist lokal beschränkt blieben, hat sich heute daraus ein globales Problem entwickelt. Die zunehmenden Emissionen von Stickoxiden und Koh- ▷

Wie ändert sich die für den Methanhaushalt so wichtige Konzentration an OH in der Atmosphäre, wenn der Verkehr zu Lande auf regenerativ erzeugten Wasserstoff umgestellt wird? Das Resultat der Simulation: Im Mittel sinkt die OH-Konzentration um einige Prozent, entsprechend steigt aber der Anteil am Treibhausgas Methan.



Ottomotor mit Kältetank

BMW sagt ja zum Wasserstoff, aber im Verbrennungsmotor

Wasserstoff und Sauerstoff ergeben eine energiereiche Mischung, aus dem Chemieunterricht als Knallgas bekannt. Ein Funken genügt und beide reagieren miteinander explosiv zu Wasser. Brennstoffzellen bremsen diese Reaktion und schicken sie auf einen elektrochemischen Umweg. Doch der muss nicht sein. Denn herkömmliche Verbrennungsmotoren laufen auf Grund einer dauernden Abfolge kontrollierter Explosionen.

Deshalb haben die Bayerischen Motorenwerke (BMW) entschieden, ihre Vision eines Wasserstoff-Fahrzeugs auf die etablierten Technologie zu stützen. In der Rekordzeit von zehn Monaten variierten ihre Ingenieure das Benzintriebwerk des Modells 760i und entwickelten den BMW H_2R. Die Modifikationen des Zwölfzylindermotors betrafen vor allem die Motorsteuerung sowie Komponenten der Gemischbildung.

Zur Erinnerung: Der gute alte Ottomotor basiert darauf, dass Kolben in einer Arbeitsphase des Zylinders ein Gemisch aus Luft und Kraftstoff ansaugen und im nächsten Takt verdichten, bis es von der Zündkerze gezündet wird. Die Explosion treibt den Kolben aus, dessen Bewegung wird in die Rotation der Räder umgesetzt. Der 760i-Motor spritzt den Kraftstoff direkt in den Brennraum, wo er sich mit der Luft zum zündfähigen Gas vermischt. Der Wasserstoff hingegen wird vorläufig noch in Saugrohre eingeblasen, ein Ventil für die direkte Zufuhr ist in der Entwicklung. Da seine Energiedichte geringer ist als die von Benzin, führen neu entwickelte Ventile mit größerem Querschnitt dabei ein größeres Volumen zu. Eine weitere Abweichung betraf die Werkstoffe. Da ein Benzin-Luft-Gemisch auch eine schmierende Wirkung hat, Wasserstoff aber nicht, bestehen einige Komponenten nun aus widerstandsfähigeren Legierungen.

Die Motorsteuerung sorgt dafür, dass die Kraftstoffzufuhr über Ventile optimal auf die Verbrennungsprozesse abgestimmt ist. Diese verlaufen etwas anders, weil das Wasserstoff-Luft-Gemisch schneller abbrennt. Es stellen sich höhere Temperaturen als beim Benzinmotor ein und das expandierende Gas übt einen stärkeren Druck aus, was die gesamte Energieausbeute verbessert. Um unkontrollierte Rückzündungen zu vermeiden, wird die Ansaug- sowie die Abgasluft genau geregelt. Überdies vermeidet die Steuerung Kraftstoff-Luft-Gemische, bei denen schädliches NO_x entstehen könnte.

Elf Kilogramm flüssigen Wasserstoff fasst der vakuumisolierte, doppelwandige Tank. Sein Betriebsdruck liegt bei drei Bar. Durch Erwärmen wird der notwendige Gasdruck für die Kraftstoffzufuhr des Motors erzeugt. Sollte der Kältemantel beschädigt sein, reagieren ab fünf Bar Innendruck Sicherheitsventile und lassen Gas kontrolliert entweichen.

Die Prototypen erreichten Spitzengeschwindigkeiten von 300 Kilometer pro Stunde, der Motor leistete 285 PS. Zwar hat BMW Ende letzten Jahres mit Projektpartnern in Berlin die erste öffentliche Wasserstofftankstelle eröffnet, bis zur ausreichenden Infrastruktur ist es aber noch ein weiter Weg. Deshalb werden die ersten Wasserstoff-Serienfahrzeuge sowohl Wasserstoff als auch Benzin verbrennen können.

Von Klaus-Dieter Linsmeier nach Unternehmensinformationen

Ein Zwölfzylinder-Motor, der Wasser produziert.



BMW

lenmonoxid in Asien sind nicht ohne Bedeutung für die Luftqualität in Amerika und Europa – und umgekehrt.

Unsere Studie konzentriert sich bei diesem Thema auf bodennahes Ozon, das sich als Hauptbestandteil des so genannten Sommersmogs in den 1980er und 1990er Jahren einen Namen gemacht hat. Künftige Szenarien müssen sich auch mit den Auswirkungen einer Wasserstoffwirtschaft auf andere Schadstoffe – wie zum Beispiel Feinpartikel – auseinander setzen.

Reine Luft, doch nicht für alle

Troposphärisches Ozon wird erst in der Atmosphäre aus den Vorläufersubstanzen NO_x, CO und Kohlenwasserstoffen gebildet. Wie beim Methan spielen Stickoxide dabei eine wichtige Rolle. Die Abnahme ihrer Emissionen im Rahmen einer globalen Wasserstoffwirtschaft würde nach unseren Ergebnissen vor allem in den Großstädten die Luftqualität deutlich verbessern. Dies drückt sich in einer Abnahme der sommerlichen Spitzenkonzentrationen aus. Allerdings handelt es sich bei der Ozonchemie um ein komplexes nichtlineares System, und eine Verringerung der Stickoxidbelastung kann je nach Situation die bodennahe Ozonkonzentration paradoxerweise sogar erhöhen. Vor allem einige ländliche Regionen in der Abluftfahne von Großstädten in Westeuropa, Asien oder den USA wären davon betroffen. Gemäß unseren Modellvoraussagen würde der EU-Warnwert von 180 Mikrogramm pro Kubikmeter aber auch dort kaum überschritten. Insbesondere in Gebieten fern von direkten Emissionsquellen dürfte sich die Reduktion der Stickoxidemissionen in jedem Fall positiv auswirken, sodass manche Reinluftgebiete ihren Namen wieder zu Recht führen könnten.

Es gibt noch einen weiteren wichtigen Aspekt einer globalen Wasserstoffwirtschaft, und das ist der Wasserstoff selbst. Denn bei Herstellung, Lagerung, Transport und Verbrauch des leicht flüchtigen Gases entweicht unweigerlich ein Teil in die Atmosphäre. Dort wird es mit Hilfe der OH-Radikale in Wasser umgewandelt und trägt somit auf zweifache Weise zum Treibhauseffekt bei: einmal, wie bereits oben diskutiert, durch die Verlängerung der Methan-Lebensdauer, und zum Zweiten durch einen möglichen Anstieg der Konzentration von Wasser-

dampf. Der ist nicht nur ein effektives Treibhausgas. Gelangt er in die Stratosphäre, kann Wasserdampf eine Abkühlung zur Folge haben. Das würde den Abbau der Ozonschicht fördern, die uns vor der UV-Strahlung der Sonne schützt.

Welches Ausmaß Leckagen annehmen können, darüber gehen die Meinungen weit auseinander. Während in einigen großtechnischen Anlagen bereits seit mehreren Jahrzehnten Verlustraten von weniger als 0,1 Prozent erreicht werden, prognostizieren manche Studien bis zu 20 Prozent bei einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Das erscheint uns allerdings unsinnig, denn Verlustraten von mehr als drei Prozent wären weder wirtschaftlich noch sicherheitstechnisch tragbar. Als untere Grenze setzen wir in unserem Szenario ein Prozent an, denn weit geringere Leckagen ließen sich global nur durch kostspielige und damit unrealistische Maßnahmen verwirklichen.

Gegenwärtig enthält die Atmosphäre rund 130 Millionen Tonnen Wasserstoff, davon stammt etwa die Hälfte aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe und Biomassen. Die andere Hälfte wird in der Atmosphäre durch Oxidation von Methan und sonstigen organischen Verbindungen erzeugt. Ein kleiner Teil entweicht auf Grund seines geringen Molekulargewichts aus der Atmosphäre, der weitaus größere wird jedoch durch Mikroorganismen im Erdboden gebunden oder durch OH-Radikale oxidiert.

Leider sind die Quellen und Senken des atmosphärischen Wasserstoffs immer noch unzureichend bekannt. Darum ist es schwierig, die zukünftige Entwicklung bei einem Ersatz von fossilen Kraftstoffen durch Wasserstoff verlässlich abzuschätzen. Gelingt es, die unvermeidbaren Leckraten bei etwa ein Prozent zu halten, so dürfte sich nach unseren Rechnungen die atmosphärische Wasserstoffkonzentration kaum erhöhen. Bei einer angenommenen Leckrate von drei Prozent ist hingegen schon mit einer Zunahme von 40 bis 70 Prozent zu rechnen. Selbst dann aber stellt Wasserstoff keine Gefahr für das Klimasystem dar, denn die Zunahme von Wasserdampf und die Abnahme der OH-Radikale wären vernachlässigbar.

Um eine global bedeutsame Schädigung der stratosphärischen Ozonschicht hervorzurufen, müsste die Wasserstoffkonzentration mindestens um das Vierfache stärker zunehmen als in unseren Szenarien. Schließlich könnte mehr Wasserstoff auch die Mikroorganismen im Boden beeinflussen. Dafür wurden jedoch bislang keine Anhaltspunkte gefunden. Somit zeichnen sich gegenwärtig keine schädlichen Konsequenzen einer erhöhten Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre ab. Auf Grund des geringen Kenntnisstands zu diesem Thema ist hier weitere Forschung jedoch dringend angebracht.

Die Umstellung unserer Energiewirtschaft auf wasserstoffbasierte Systeme würde unseren Modellrechnungen zufolge die Emissionen verschiedener Spurengase erheblich verändern und damit sehr wahrscheinlich spürbare Auswirkungen auf das Klimasystem und die Luftverschmutzung haben. Dabei werden vor allem die reduzierten Stickoxidemissionen Wirkung zeigen: Während sich einerseits die Luftqualität in den meisten Gebieten der Erde verbessert, entsteht ohne weitere Maßnahmen zur Emissionsminderung mehr Methan, das den Treibhauseffekt ankurbelt.

Aus Fehlern lernen

Ob durch die Wasserstofftechnologie eine Abnahme der CO_2-Emissionen erreicht werden kann, hängt entscheidend davon ab, wie der Brennstoff erzeugt wird. Bei der Nutzung regenerativer Energien wird es oftmals effizienter sein, die anfallende Energie direkt zu verbrauchen, anstatt sie in Form von Wasserstoff zwischenzuspeichern. Wasserstoff entwickelt seine Stärken vor allem im Verkehrssektor, wo er einen erheblichen Beitrag zur Eindämmung der Luftverschmutzung liefern kann.

Im Gegensatz zum Beginn des 20. Jahrhunderts, als die ersten Automobile in Serie gingen, ist heute hinlänglich bekannt, dass vom Menschen verursachte Emissionen einen gravierenden Einfluss auf unsere Atmosphäre zeitigen. Wir sollten nicht noch einmal den Fehler machen, diese Konsequenzen erst im Nachhinein zu analysieren.



Martin G. Schultz arbeitet am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Er hat am Forschungszentrum Jülich und in Wuppertal promoviert und war Postdoc an der Harvard University.

AUTOR

WEBLINKS UND LITERATURHINWEISE

Welche Chancen und Risiken birgt eine globale Wasserstoffwirtschaft für Umwelt und Klima? Das Projekt HyCare geht dieser Frage nach: www.mpimet.mpg.de/en/depts/dep1/acc/hycare/HyCARE_index.html

Derzeit betriebene Wasserstoff-Fahrzeuge und -Tankstationen: www.h2cars.de/index.html

Eine schöne Übersicht über Fahrzeugprototypen und ihre Spezifikationen bietet auch www.event.hfpeurope.org/exhibition/index.html

HyWeb, das Internet-Informationssystem zu den Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen: www.hyweb.de/indexd.html

Den Beitrag »Wasserstoff in der Energiewirtschaft« von W. Zittel, R. Wurster und W. Weindorf (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2002) finden Sie dort unter www.hyweb.de/Wissen/w-i-energiew.html

Hier präsentiert die Europäische Gemeinschaft ihre Aktivitäten: http://europa.eu.int/comm/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_hlg/article_1261_en.htm

Daten und Fakten rund um den Wasserstoff bietet die Seite: www.h2data.de/

Die Linde AG ist einer der größten Wasserstoffproduzenten: www.linde-gas.de/international/web/lg/de/likelgde.nsf/docbyalias/wasserstoff_technologie#

Ein 2004 erschienener Bericht des dänischen Risø National Laboratory über den Stand der Forschung und die Marktchancen der Wasserstoffwirtschaft: www.risoe.dk/rispubl/energy_report3/ris-r-1469.htm

Die Homepage des europäischen Brennstoffzellen-Forums www.efcf.com/ bietet unter »/reportsE09.pdf« einen kritischen Beitrag von Ulf Bossel

Hamburg hat in Sachen Wasserstoff einiges zu bieten, vom Bus-Projekt CUTE bis zur Messe H2-Expo:
www.hh2wasserstoff.de/CUTE/HH2/ www.hamburg-messe.de/H2Expo/h2_de/start_main.php

Auf den Seiten der Autohersteller liefern Suchmaschinen zu den Begriffen »Wasserstoff« und »Brennstoffzelle« interessante Seiten oder Dokumente zum Download:
BMW: www.bmw.de;
DaimlerChrysler: www.daimlerchrysler.com/dccom;
Ford: www.ford.com/en/default.htm;
General Motors: www.gm.com/;
Honda: www.honda.com/index.asp?bhcp=1;
Toyota: www.toyota.com/;
VW: www.volkswagen.de

Die Erde im Treibhaus. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 2/2005

Die Wasserstoffwende. Eine neue Form der Energieversorgung. Von Henning Boetius. dtv, 2005

Air pollution and climate-forcing impacts of a global hydrogen economy. Von Martin G. Schultz et al. in: Science, Bd. 302, S. 624, 2003

Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001

Flotte auf Kurs

Ein wichtiger Schritt zum Brennstoffzellen-Fahrzeug ist getan – die ersten Testflotten kreuzen auf der Straße. Doch von einer Serienfertigung sind die Hersteller noch weit entfernt.

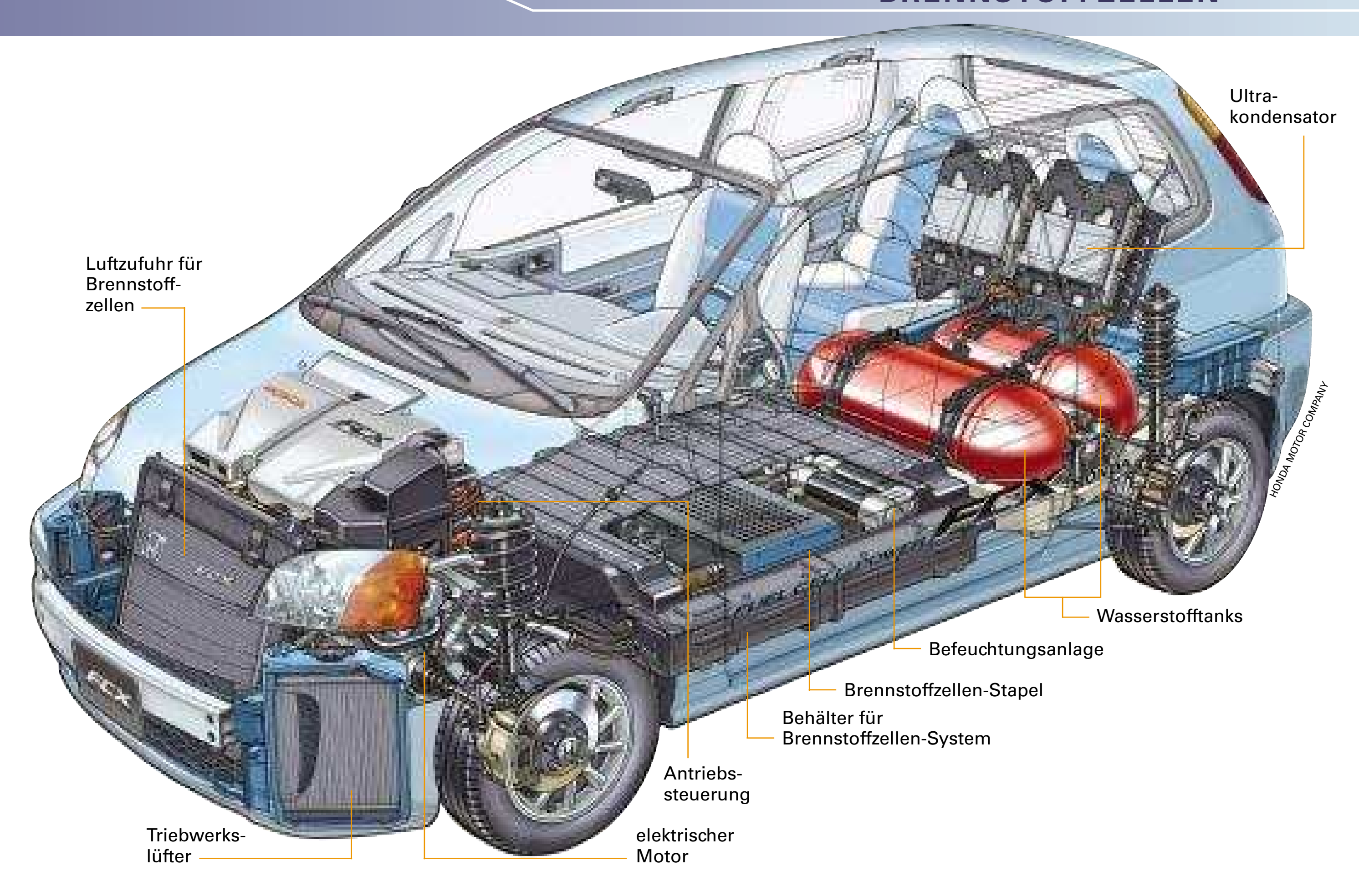
Von Steven Ashley

Die Radarfallen an der Zufahrt von Nabern in Schwaben scheinen das Einzige zu sein, was Rosario Berretta Kummer bereitet. Der DaimlerChrysler-Ingenieur leitet ein Team, das sechzig Fahrzeuge mit dem neuesten Brennstoffzellen-Fahrzeug für den weltweiten Probebetrieb unter diversen Fahrbedingungen vorbereitet. Eigentlich wirkt der F-Cell wie ein konventioneller Kleinwagen, fährt und handhabt sich auch so. Das einzig Ungewöhnliche scheint das Schwirren des Kompressors, das die Ingenieure aber bald dämpfen wollen. Deshalb legt Berretta solchen Wert darauf, dass seine Besucher die hohe Anfangsbeschleunigung des F-Cell ausprobieren – einen der Vorteile, die ein elektrischer Motor bietet. Aber solche Manöver müssen warten, bis die Radarfallen im Rückspiegel verschwinden.

DaimlerChrysler ist nicht allein auf der Suche nach dem umweltfreundlichen Fahrzeug. Nach einem Jahrzehnt gezielter Forschung stehen diverse Testflotten bereit: Zwanzig von Hondas neuem FCX und dreißig mit Brennstoffzellen betriebene Kompaktautos des Typs FCV von Ford werden in Kürze über die Autobahnen fahren. Dreißig DaimlerChrysler-Busse befördern schon Fahrgäste in zehn europäischen Städten und jeweils drei weitere sollen bald Peking und Perth erreichen. General Motors, Toyota, Nissan, Renault, Volkswagen, Mitsubishi und Hyundai haben zumindest Prototypen entwickelt und BMW geht seinen eigenen Wasserstoff-Weg (siehe Kasten auf S. 96). Insgesamt 600 bis 800 Brennstoffzellen-Fahrzeuge rund um den Globus haben das Versuchsstadium erreicht. Und die Zulieferer der Automobilindustrie haben begonnen, Komponenten zu entwickeln und anzubieten. Alles in allem scheint eine Markt-

DAIMLERCHRYSLER

DaimlerChrysler testet derzeit das F-Cell-Brennstoffzellen-Fahrzeug auf Straßentauglichkeit.



einführung zu Beginn des nächsten Jahrzehnts erreichbar.

Konfrontiert mit immer strengeren gesetzlichen Regelungen zur Abgasemission, einer drohenden Ölknappheit und dem durch Verbrennungsmotoren angeheizten Treibhauseffekt, haben Industrie und Regierungen in den letzten zehn Jahren etliche Milliarden Euro in die Verwirklichung einer sauberen, effizienten Antriebstechnik investiert, die den altehrwürdigen Benzin- oder Dieselmotor ersetzen soll. Vorstände versichern, dass auf lange Sicht kein Weg an der Wasserstoffwirtschaft vorbeiführe. Alle durchaus praktikablen Alternativen wie das Hybridauto (das einen Verbrennungsmotor mit elektrochemischen Batterien kombiniert) verbrennen immer noch Kohlenwasserstoffe und erzeugen deshalb das Treibhausgas Kohlendioxid sowie andere Schadstoffe. Kritiker erachten den bisherigen Forschungs- und Entwicklungsaufwand als zu gering, sie zweifeln schlicht an den guten Absichten der Unternehmen, deren Strategien normalerweise wesentlich kurzfristiger gedacht sind. Brennstoffzellen-Fahrzeuge dienten lediglich als Verschleierungstaktik, um vorläufig das gewohnte Geschäft weiterführen zu können.

Ob diese Kritiker Recht haben oder die Technik schlicht problematisch ist – zwei Stunden Fahrt auf der Autobahn, zum Beispiel von Nabern nach Frankfurt am Main, reichen derzeit, um Vision und Wirklichkeit zu scheiden: In etwas weniger als neunzig Minuten stünde man mit leerem Tank am Straßenrand. Von der heute üblichen Reichweite von 500 Kilometern ist der Brennstoffzellen-Antrieb weit entfernt, und Wasserstofftankstellen sind Mangelware.

Die wesentlichen Fragen also sind: Wie lässt sich die Kapazität des Tanks wesentlich erhöhen? Durch welche Maßnahmen kann der Preis für den Antrieb auf ein Hundertstel des gegenwärtigen sinken, während sich gleichzeitig die Lebensdauer des Motors verfünffacht? Und wie soll ein internationales Netz von Wasserstofftankstellen wachsen? Sogar einige Hersteller sind skeptisch: »Es könnten gut und gerne noch 25 Jahre vergehen«, erklärt Bill Reinert, Landeschef der amerikanischen Forschungsabteilung bei Toyota. Ein deutliches Indiz für die Probleme ist die ▷

Wasser im Tank. Hondas FCX-Modell von 2005 ist ein typischer Vertreter des aktuellen Stands der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technik mit Polymermembran. Der Viersitzer bietet eine Höchstgeschwindigkeit von 150 Kilometer pro Stunde und eine Reichweite von 320 Kilometern.

IN KÜRZE

- Die Automobilindustrie schickt rund zehn Jahre nach den ersten Prototypen nun **Fahrzeugflotten mit Brennstoffzellen-Antrieb** auf die Straße. Insgesamt wurden viele Milliarden Euro in Forschung und Entwicklung investiert, aber bis zur Kommerzialisierung ist es noch ein weiter Weg.
- Hohe Kosten, **geringe Speicherfähigkeit der Wasserstofftanks** und die mangelnde Infrastruktur zählen zu den größten Hindernissen.
- Eine **Serienproduktion** ist nicht vor Mitte des nächsten Jahrzehnts zu erwarten.

▷ einhellige Forderung fast aller Firmen nach einem stärkeren Regierungsengagement bei der Grundlagenforschung und bei den Wasserstoff-Verteilungsnetzen.

Dabei klingt alles so einfach und schlüssig. Eine Brennstoffzelle liefert elektrischen Strom, der einen Elektromotor antreibt. Anders als eine Batterie speichert sie aber keine Energie, sondern setzt diese in einem elektrochemischen Prozess frei. Der läuft so lange, wie Wasserstoff und Sauerstoff zugeführt werden (siehe Illustration unten). Dafür, dass die beiden Reaktionspartner nicht schlicht als Knallgas explodieren, sorgt eine dünne, aus einer Fluor-Kohlenstoff-Verbindung bestehende Polymermembran, die PEM (Protonaustauschmembran, englisch *proton exchange membrane*). Elektrische Energie entsteht, wenn Elektronen an katalytischen Bereichen der Membranoberfläche von Wasserstoffatomen abgetrennt werden. Weil die Membran positive Ladungsträger – Wasserstoff-Ionen, das heißt Protonen – leitet, wandern diese auf die andere Seite. Dort vereinen sie sich mit Sauerstoff und einem Elektron zu Wasser. Einzelne derartige Elemente werden zu Stapeln kombiniert.

PEM-Brennstoffzellen haben in der Theorie viele Vorteile: Sie sollten 55 Prozent der in den zugeführten Gasen enthaltenen chemischen Energie verwerten, während ein Verbrennungsmotor nur rund 30 Prozent für den Antrieb nutzt und den Rest großteils als Wärme abgibt. Apropos: Während in den Zylindern eines Ottomotors kurzzeitig 3000 Grad herrschen und die Abgastemperatur immer noch bei rund 1100 Grad liegt, arbeitet die PEM-Zelle bei nur 80 Grad Celsius. Deshalb wäre ein einfacher und sicherer Betrieb mit geringer Wartung möglich.

Ein Stück Zellophan löst Probleme

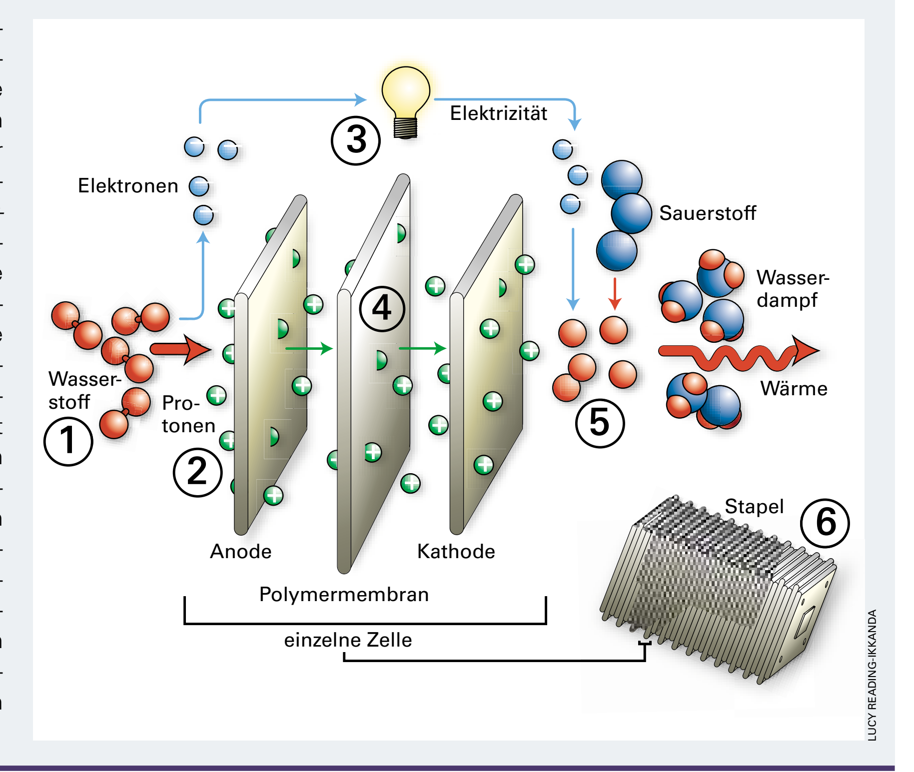
Doch gerade die Membranen sind leider auch die Krux derzeitiger Prototypen und Testfahrzeuge. Sie verursachen bis zu 35 Prozent der Kosten eines Zellenstapels. Die Energieeffizienz fällt schlechter aus als theoretisch möglich, weil die Membranen geringe Treibstoffmengen ungenutzt passieren lassen (Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 66). Weitere Punkte auf der Wunschliste der Automobilfirmen an die Membranhersteller: verbesserte chemische und mechanische Stabilität für eine längere Lebensdauer, weniger chemische Nebenreaktionen, mehr Toleranz gegenüber Treibstoffverunreinigungen oder unerwünschten Nebenprodukten wie Kohlenmonoxid.

Dementsprechend erregt war die Szene letzten Herbst über eine Nachricht von PolyFuel, einer kleinen Firma in Mountain View (Kalifornien). Angeblich sei es gelungen, eine Hydrokarbonmembran zu entwickeln, die größere Leistung bei niedrigeren Kosten bringe als herkömmliche perfluorierte Membranen. »Sie sieht aus wie ein Stück Zellophan«, versichert Vorstand James Balcom. Warum sie mehr leisten soll als etwa DuPonts Material Nafion, habe eine ganze Reihe von Gründen, wie etwa eine höhere Betriebstemperatur bis zu 95 Grad Celsius und eine um 50 Prozent längere Haltbarkeit bei 10 bis 15 Prozent höherer Energieausbeute. Vor allem aber: Sie koste nur die Hälfte. Viele Forscher stehen diesen Lobpreisungen nach wie vor skeptisch gegenüber, doch Honda verwendet die neuen Membranen bereits.

Eine weitere Schlüsselkomponente der PEM-Brennstoffzellen ist die dünne Katalysatorschicht aus Platin auf beiden Seiten der Membran, die 40 Prozent der

Das Innenleben einer Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle erzeugt so lange Elektrizität, wie sie mit Sauerstoff und Wasserstoff beliefert wird. Der für mobile Anwendungen auf Grund der geringen Betriebstemperatur geeignete Typus der Brennstoffzelle mit Protonaustauschmembran (PEM, englisch *proton exchange membrane*) besteht aus zwei dünnen, durchlässigen Elektroden – Anode und Kathode – sowie einer Polymermembran, die Protonen leitet. Platinbasierte Katalysatoren bedecken jeweils eine Seite der Elektroden. Nachdem Wasserstoffatome in die Zelle gelangen (1), spaltet der Anodenkatalysator sie in Elektronen und Protonen (2). Erstere fließen nach außen ab und treiben den Elektromotor an (3), während die Protonen durch die Membran zur Kathode wandern (4). Der Katalysator auf dieser Seite kombiniert Protonen mit den hier eintreffenden Elektronen sowie Sauerstoff zu Wasser (5). Viele Zellen werden zu Stapeln kombiniert, um größere Spannungen zu erhalten (6).



Stapelkosten ausmacht. Der Katalysator bereitet Wasserstoff (aus dem Treibstoff) und Sauerstoff (aus der Luft) durch Spaltung der stets paarweise daherkommenden Elemente und durch Abgabe beziehungsweise Aufnahme von Elektronen auf die chemische Reaktion vor. Außerdem fördert das Edelmetall auch die abschließende Reaktion aller Partner zu Wasser (H_2O). Vor allem diese muss sehr genau gesteuert werden, da sich auch Nebenprodukte wie aggressives Wasserstoffperoxid bilden können, die der Zelle schaden.

Wegen der hohen Kosten des Platins suchen die Forscher das Verfahren zu optimieren. Sie steigern die Wirksamkeit des Katalysators, um mit weniger Material für die gleiche Leistungsabgabe auszukommen, stabilisieren die Struktur der Katalysatorschicht, damit sie sich langsamer abnutzt, und reduzieren Nebenreaktionen, die ihn verschmutzen und so seine Effektivität mindern können. Kürzlich vermeldeten Forscher der Firma 3M einen Erfolg: Indem sie die Membranoberfläche im Bereich von Nanometern strukturierten, formte das darauf abgeschiedene Platin »Wälder aus winzigen Säulen«, was die Katalysatorfläche und damit seine Wirksamkeit signifikant erhöhte. Andere Forscher prüfen alternative Materialien wie zum Beispiel Kobalt und Chrom.

Lassen sich die Kosten des Antriebs erst einmal reduzieren, bleibt aber immer noch das Problem der ungenügenden Reichweite eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs. Fünf bis sieben Kilogramm Wasserstoff brächten ein Auto bis zu 800 Kilometer weit, die Prototypen haben aber nur 2,5 bis 3,5 Kilogramm an Bord. »Niemand weiß, wie er die doppelte Menge unterbringen soll«, sagt Dennis Campbell, Chef von Ballard Power Systems in Vancouver, einem der führenden Stapelhersteller.

Teure Kältetechnik

Typischerweise wird Wasserstoff als hoch komprimiertes Gas bei Umgebungstemperatur gespeichert. Viele Ingenieurteams arbeiten an der Verdopplung des Drucks von derzeit 350 Bar, was aber nicht automatisch auch die zweifache Speichermenge bedeutet. Eine Alternative ist die Speicherung von flüssigem Wasserstoff bei –253 Grad Celsius, doch die erforderliche Kältetechnik verbraucht dann etwa ▷

ein Drittel der Treibstoffenergie. Zudem gehen bei diesen Systemen trotz aufwändiger Isolierung jeden Tag etwa fünf Prozent des Gases verloren. Lösungsansätze gibt es viele, doch den Stein der Weisen hat noch niemand gefunden. »Was wir im Labor vorführen können, ist noch weit entfernt von einem kompakten, langlebigen und erschwinglichen Speicher«, räumt Lawrence Burns ein, Leiter der Abteilung Forschung, Entwicklung und Planung bei General Motors.

Als viel versprechende Kandidaten gelten Metallhydridsysteme. Das Wasserstoffgas wird unter Druck in den Tank eingefüllt und bindet unter Wärmeabgabe chemisch an das Kristallgitter des fraglichen Metalls. Abwärme aus dem Brennstoffzellen-Stapel wird dazu verwendet, die Reaktion umzukehren und den Treibstoff freizugeben. Im Januar haben General Motors und die Sandia National Laboratories ein mehrere Millionen Euro teures Vierjahresprojekt zur Entwicklung eines Tanks gestartet, der auf einem Natrium-Aluminium-Hydrid basiert. Der Automobilhersteller verkündete außerdem erste Erfolge seiner Zusammenarbeit mit den HRL-Laboratorien in Malibu (Kalifornien). Ein Ansatz ist, Wasserstoff zunächst auf –196 Grad Celsius zu kühlen, der leichter zu erreichenden Temperatur von flüssigem Stickstoff. Unter hohem Druck lagert er sich dann schnell an die inneren Oberflächen poröser Materialien wie pulverisiertem Kohlenstoff, entsprechender Polymere und metallorganischer Moleküle. Eine zweite Entwicklung zielt darauf ab, die Bindung von Wasserstoff in Metallhydriden durch Zusätze wie Silizium zu schwächen, sodass die Speicher das Gas schon bei 275 Grad Celsius statt 400 Grad wieder freigeben.

Eiszeit für den Wasserstoff

Auch exotische Ansätze haben derzeit eine Chance auf Forschungsgelder. Da Metallhydridsysteme relativ schwer sind – für die genannte Menge von fünf bis sieben Kilogramm Wasserstoff kämen insgesamt bis zu 300 Kilogramm auf die Waage –, versuchen Wissenschaftler der Universität Delft in den Niederlanden den Brennstoff in nanometergroßen Zwischenräumen von Eis einzufangen. Allerdings erfordern solche Wasserstoffhydrate normalerweise Drücke von rund 2500 Bar. Eine Zusammenarbeit mit der Colorado School of Mines, einer Hochschule mit Schwerpunkt in den Bereichen Bergbau, Umwelt und Energie, brachte einen Hoffnungsstreif am Horizont: Die Substanz Tetrahydrofuran stabilisiert Gashydrate derart, dass ein Tank schon bei 100 Bar zu betreiben wäre. Theoretisch sollte es damit möglich sein, sechs Kilogramm Wasserstoff in 120 Litern Wasser zu speichern, das Gewicht des Speichers wäre dann um mehr als die Hälfte reduziert.

Normalerweise schätzen Brennstoffzellen-Entwickler keine Minusgrade außerhalb des Wasserstofftanks. Deswegen war es ein besonderes Ereignis, als der Gouverneur des amerikanischen Bundesstaats New York an einem stürmischen Novembermorgen im vergangenen Jahr zwei Honda-FCX in Albany begrüßte. Alle vorherigen Demonstrationen mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen erfolgten bei wärmerer Witterung. Denn Minusgrade verwandeln Wasser in Eiskristalle und die durchlöchern Membranen oder verstopfen Leitungen. Hondas Ingenieure bewiesen die Winterfestigkeit ihrer Brennstoffzellen, sie sollen selbst –20 Grad Celsius problemlos verkraften. Andere Autofirmen einschließlich DaimlerChrysler verkündeten mittlerweile ähnli-

Kältefeste Brennstoffzellen

Die Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturen unter null war lange Zeit ein Hauptziel für die Entwickler von Brennstoffzellen-Stapeln. Wenn Stapel gefrieren, wird das Wasser darin zu Eis, was die Membranen durchlöchern und Rohre verstopfen kann. Letztes Jahr konnten Hondas FCX-Entwickler demonstrieren, dass die Brennstoffzellen-Energiequelle im jüngsten FCX-Hecktürmodell (rechts) selbst bei –20 Grad Celsius immer anspringt. Forscher von DaimlerChrysler (unten) und General Motors haben bereits Ähnliches vorgeführt.


DAIMLERCHRYSLER



HONDA MOTOR COMPANY

Designfreiheit durch Brennstoffzellen

Der Entwurf des Brennstoffzellen-Fahrzeugs Sequel von General Motors (rechts) soll genügend Treibstoff für 500 Kilometer an Bord haben: Das entspricht der akzeptablen Mindestreichweite. Erreicht wird dies durch die Aufnahme von sieben Kilogramm Wasserstoff bei einem Druck von 700 Bar. Der Druckbehälter passt in ein 30 Zentimeter dickes Chassis in Form eines Skateboards, das auch alle allgemeinen Steuersysteme enthält. Der Sequel demonstriert, wie ein vollständig elektrisch betriebenes Fahrzeug den Designern völlig neue Möglichkeiten gibt. Da rein mechanische Bestandteile wie das Lenkrad durch elektronische Komponenten ersetzt werden können, lässt sich zum Beispiel der Innenraum sehr viel offener gestalten.





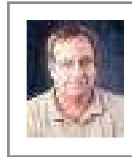
ALLE ABB. DIESER SEITE: GENERAL MOTORS CORPORATION

che Erfolge mit Kaltstart-Teststapeln im Labor. Der neue FCX besitzt zudem einen Ultrakondensator, ein Bauteil, das Energie kurzfristig im elektrischen Feld zweier Kondensatorplatten speichert. Muss ein Motor etwa an Steigungen mehr Leistung bringen, reagiert ein solches System schneller als Batterien, die bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen meist eingebaut werden.

Später an jenem Novembertag versammelte sich eine enthusiastische Menge auch am nahe gelegenen Hauptsitz von Plug Power, des in Latham (New York) ansässigen Herstellers stationärer Brennstoffzellen für Notstromaggregate. Sie feierten die Eröffnung einer Wasserstofftankstelle, die das Unternehmen gemeinsam mit Honda entwickelt hatte. Diese »Heimenergiestation« *(home energy station)* besitzt einen so genannten Dampfreformer, der Wasserstoff aus Erdgas extrahiert. Ein Teil davon versorgt den Brennstoffzellen-Stapel, der dem Firmensitz Strom liefert. Ansonsten soll das Gerät ein Auto pro Tag betanken – ein Tropfen auf den heißen Stein. Doch die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur ist ein klassisches »Henne-Ei-Problem«: Ohne Tankstellennetz wird es keine nennenswerte Nachfrage nach den Fahrzeugen geben, aber niemand wagt die erforderlichen Investitionen ohne ausreichende Nachfrage nach dem neuen Kraftstoff.

Einer Studie von General Motors zufolge wären 10 bis 15 Milliarden Dollar nötig, um in den USA 11 700 Wasserstofftankstellen – mit einer deutlichen Konzentration in den Städten – einzurichten. Mit einem solchen Netz wären etwa eine Million Fahrzeuge zu versorgen. Das klingt nach viel Geld, ist aber wenig im Vergleich zu den 85 Milliarden Dollar, die Kabelfirmen für Fernsehnetze bereit sind aufzubringen. Immerhin, ein Anfang ist gemacht. Bald sollen weltweit an die 70 Tankstellen in Betrieb sein und Kaliforniens Highway-Wasserstoffprogramm hat ein besonders ehrgeiziges Ziel – 200 Tankstellen im Sonnenstaat. ◁

AUTOR



Steven Ashley ist Journalist und Redakteur für Technologie-Themen beim Scientific American.

f-cell Award

Die Region Stuttgart will in Sachen Brennstoffzelle international eine führende Rolle übernehmen. Um das hohe Ziel zu erreichen, loben das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, die Wirtschaftsförderung Region Stuttgart und die DaimlerChrysler AG zum fünften Mal den »f-cell Award« aus. Prämiert werden anwendungsnahe Entwicklungen rund um die Brennstoffzelle, ob Bauelemente, ganze Systeme, Kraftstoff- und Betankungstechnik oder die Integration in mobile, portable oder stationäre Anwendungen. Vergeben werden Preisgelder von insgesamt € 30 000.

Die Preise werden im Rahmen des »f-cell«-Kongresses (26. bis 28. September 2005) in der Landeshauptstadt überreicht. Nähere Informationen unter

www.f-cell.de

LEBEN

Stefan Klein

Alles Zufall

Die Kraft, die unser Leben bestimmt

Rowohlt, Reinbek 2004. 377 Seiten, € 19,90

Der Libellenflügel ist ein unübertroffenes Meisterwerk der Natur. Kein anderes Tier vollführt mit so wenig Material- und Energieaufwand so vielseitige, komplizierte und elegante Flugmanöver. Gleichwohl sind es nicht die Libellen, sondern die evolutionär viel jüngeren Fliegen und deren Verwandte, die mit einem weit einfacheren und weniger effizienten Flugapparat den bodennahen Luftraum beherrschen.

Der amerikanische Psychologe David Rosenhan schickte 1968 gesunde Freiwillige in psychiatrische Kliniken mit dem einzigen – erdichteten – Symptom, sie hätten unerklärliche Stimmen gehört. Daraufhin interpretierte das Klinikpersonal jede, auch die normalste Äußerung der Pseudopatienten als Anzeichen von Schizophrenie.

Das Verhalten der Eltern hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Neigungen und der von ihnen erzogenen Kinder.

Alles Zufall? Na ja. Stefan Klein hat als Wissenschaftsredakteur des »Spiegel« jahrelang an einer äußerst ergiebigen Quelle für erstaunliche und verstörende Geschichten gesessen. Sein Buch präsentiert eine gelungene Auswahl; da quillt die Fülle der Themen gelegentlich über das Korsett des Buchtitels hinaus.

Mich hat das nicht ernsthaft gestört. Da in der Tat alles in unserem Leben vom Zufall bestimmt wird, hat der Autor eine wohlfeile Ausrede, über alles in unserem Leben zu schreiben. Und von dieser Freiheit macht er durchaus wohldosierten Gebrauch.

Wahrhaft ein unglaublicher Zufall ist es, wie der Taxifahrer Barry Bagshaw nach mehr als dreißig Jahren seinen verlorenen Sohn wiederfindet – als ganz gewöhnlichen Fahrgast. Zwei Menschen, die miteinander nichts zu tun haben, entkommen knapp dem Terroranschlag ▷



GEOLOGIE

Dirk J. Wiersma

Zauber der Mineralien und Gesteine

Aus dem Englischen von Clemens Wilhelm.
Springer, Heidelberg 2004. 160 Seiten, € 49,95

Dirk Wiersma, Geologe und Fotograf aus Utrecht (Niederlande), hat keinen besonderen Wert auf wissenschaftliche Systematik gelegt. Seine Bilder sind in loser Folge vom Großen zum Kleinen angeordnet. Aber was für Bilder!

Hauchzarte Schichten von tiefrotem Hämatit fassen eine geheimnisvolle schwarze Quarzkristallhöhle ein. Es wirkt wie aus einer fremden Welt, aber es stammt von der französischen Mittelmeerküste: Erst die Poliertechnik und die Vergrößerung lassen das Mineral nach Sciencefiction aussehen.

Als ein Ammonit versteinerte, füllten kleiner und kleiner werdende Kristalle die durch Verwesung frei gewordenen Hohlräume. Im Dünnschliff zeigt sich ein farbenfrohes Fraktal.

Und erst durch Nachschlagen entdeckt man, dass die seitenfüllend abgebildete, surreale Landschaft »Torres d'espumoso« in Wirklichkeit nur zweieinhalb Zentimeter groß ist.

Ein wundervolles Buch, an dem die Fantasie nicht müde wird.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft in Heidelberg.



▼ Ein Kunstwerk der Natur: Runde Konkretionen aus feinkörnigem, weißem Sand, der durch den Druck in der Tiefe fest zusammengebacken wurde. Diese »Umarmung« stammt aus einem Steinbruch südlich von Paris und ist 35 Zentimeter hoch.

vom 11. September, nur um zwei Monate später beim Absturz eines Flugzeugs nach Santo Domingo kurz nach dem Start ums Leben zu kommen. Für die Betroffenen und deren Hinterbliebene ist ein solches Zusammentreffen derart aufwühlend, dass Gedanken an eine – gütige oder grausame – Vorsehung sich aufdrängen. Aber dem Journalisten, der Zugang zu Nachrichten aus aller Welt hat, zeigt ein einfaches Rechenexempel, dass eine so unglaubliche Geschichte wie die von Vater und Sohn Bagshaw irgendwo auf der Welt so gut wie sicher passieren wird. Der Hauptgewinn, Ereignis des Lebens für den Lottospieler, ist für die Lottogesellschaft Standard.

Um den Zufall richtig einschätzen zu können, muss man also Klarheit über die Grundgesamtheit gewinnen, aus der das aktuelle Ereignis eine Stichprobe ist – oder zumindest so gesehen werden kann. Der Mensch aber, stets auf der Suche nach berechenbaren und sinnvollen Mustern, neigt dazu, den Einfluss des Zufalls zu unterschätzen. So passen auf einmal der Irrtum der Klinikpsychiater und die bei Eltern systematisch auftretende Überschätzung der eigenen Erziehungsleistung zum Thema.

Unbestreitbar spielt der Zufall in der Entwicklung der Arten ebenso eine entscheidende Rolle wie in zahlreichen physikalischen Phänomenen. Meistens spricht man dann über ihn, wenn kleine, zufällige Änderungen große Wirkungen haben. Aber das kommt deutlich seltener vor, als man noch vor zwanzig Jahren in der Begeisterung über die Chaostheorie und den Schmetterlingseffekt glaubte.

Aus einer detaillierten Analyse des Bergbahnunglücks von Kaprun am 11. November 2000 und anderer Katastrophen destilliert Stefan Klein einen Satz beherzigenswerter Lebensregeln: Sperre den Zufall nicht mit Gewalt aus, vor allem nicht aus deinen Gedanken, sondern versuche seine guten und seine schlechten Folgen in eine erträgliche Mischung zu bringen. Unter Unsicherheit triff statt einer großen Entscheidung lieber viele kleine; dadurch hast du mehr Chancen, auf die unvermeidlichen Zufallsereignisse zu reagieren.

Eine bunte Mischung guter Geschichten wird durch den erstklassigen Schreibstil des Autors zum Genuss.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft in Heidelberg.



KULTURANTHROPOLOGIE

Desmond Morris

Die nackte Eva

Der weibliche Körper im Wandel der Kulturen

Aus dem Englischen von Jochen Winter. Heyne, München 2004. 272 Seiten, € 22,–

Der 1928 geborene britische Zoologe und Verhaltensforscher Desmond Morris wurde Ende der 1960er Jahre erstmals mit seinem internationalen Bestseller »Der nackte Affe« bekannt. Dem folgten weitere Erfolge wie »Dogwatching«, »Catwatching« und »Bodywatching« (deutsch »Körpersignale«). Aus einer anfänglich geplanten, revidierten Neuauflage des letzten Titels entstand »Die nackte Eva«, die noch »einige wenige Passagen« des Vorgängers enthält. Daher rührt auch die Gliederung des Buchs, die jede Körperregion in einem eigenen Kapitel begutachtet.

Offensichtlich ist es dem Autor jedoch nicht gelungen, sich von seinem alten Konzept so weit zu lösen, dass er dem neuen Aspekt weiblicher Schönheit gerecht geworden wäre. Nicht nur einige wenige, sondern sehr viele Passagen aus »Bodywatching« findet man in leicht abgeänderter Form in der »Nackten Eva« wieder. Dadurch überwiegt oft der Anteil an allgemeiner Anatomie und Funktionalität der Körperteile.

Um das auszugleichen, hängt der Autor an jedes Kapitel einzelne Geschichten über die entsprechende Körperpartie an, von kulturellen Unterschieden beim weiblichen Schönheitsbegriff bis hin zu diversen altertümlichen und modernen Techniken der Manipulation. So erfährt der Leser, dass Lidschatten bereits im alten Ägypten verwendet wurde, wie der Zungenkuss entstand, in welchen Kulturen Halsverlängerungen schick sind und dass Frauen mit Zungenpiercing besonders vom Blitzschlag gefährdet sind. Das Märchen von Aschenputtel geht darauf zurück, dass in China traditionell kleine Füße bei Frauen als Schönheitsmerkmal gelten.

So interessant und amüsant viele der Geschichten sind, es fehlt dem Buch doch eine neue Kernaussage. Morris vermischt kulturhistorische und biologische Aspekte; dagegen schweigt er über grundlegende Erklärungsansätze aus der Theorie der sexuellen Selektion, die körperliche Merkmale und die Präferenzen für diese als adaptiven evolutionären Prozess sehen und damit hilfreich für ein fundamentales Verständnis von Schönheit und Ästhetik sind. Häufig erklärt er Merkmale als Folge der Neotenie – der Mensch ist, verglichen mit seinen nächsten evolutionären Verwandten, ein ▷

Das wohlbekannte Herzsymbol mit seinem Einschnitt oben sieht kaum wie das echte Herz aus. Dagegen findet sich eine frappante Ähnlichkeit an anatomisch nicht gerade nahe liegender Stelle: dem von hinten betrachteten weiblichen Gesäß.



▷ Spätentwickler; oder sie hätten sich ausgebildet, weil sie ein Spiegel weiblicher Genitalien seien; weitere Hypothesen führt er nicht an. Andere dagegen sind sehr gewagt, und die Erkenntnisse mancher Kapitel entsprechen nicht dem neuesten Stand der Forschung.

Es wäre wünschenswert gewesen, hätte Desmond Morris in der »Nackten Eva« jüngere Arbeiten aus Bereichen der Evolutionären Anthropologie und Psychologie über »Darwin'sche Ästhetik« einfließen lassen. Insbesondere Eckart Voland und Karl Grammer bemühen sich in »Evolutionary Aesthetics« (Springer, 2003), die Unterschiede zwischen Mann und Frau als Vorzüge der Geschlechter zu sehen. So geben sie eine evolutionäre Begründung für geschlechtsspezifische Merkmalsausprägungen und die entsprechenden Präferenzen hierfür: Es ist für den Bestand einer Population vorteilhaft, wenn die Geschmäcker – zum Beispiel – der Männer verschieden sind, weil dadurch die verschiedensten Frauentypen eine Fortpflanzungschance erhalten und so eine größere Variabilität innerhalb der Population zu Stande kommt.

Angesichts der Tatsache, dass immer mehr Menschen den Schönheitschirurgen in Anspruch nehmen, um einem Idealbild zu entsprechen, kommt dem Unterfangen, auch dem »nicht perfekten« Menschen volle Wertschätzung entgegenzubringen, heute besondere Bedeutung zu. Eine Darstellung evolutionsbiologischer Grundlagen und Mechanismen für diese Variabilität weiblicher Schönheit wäre dafür hilfreich gewesen, fehlt aber in der »Nackten Eva«.

Insgesamt ist das Buch amüsant, aber wenig lehrreich.

Silke Wohlrab

Die Rezensentin ist Diplombiologin und promoviert in der Abteilung für Soziobiologie/Anthropologie der Universität Göttingen.



ENTWICKLUNGSBIOLOGIE

Christiane Nüsslein-Volhard

Das Werden des Lebens

Wie Gene die Entwicklung steuern

C.H.Beck, München 2004. 208 Seiten, € 19,90

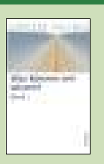
Wie entsteht aus Spermium und Eizelle ein so komplexes Wesen wie der Mensch? Warum sehen Kinder ihren Eltern ähnlich? Woher weiß eine Zelle, welche speziellen Eigenschaften sie annehmen soll? Christiane Nüsslein-Volhard, Nobelpreisträgerin und Direktorin des Max-Planck-Instituts für Entwicklungsbiologie in Tübingen, stellt sich der Aufgabe, dieses große Forschungsgebiet, das lebhafte öffentliche Aufmerksamkeit genießt, verständlich darzustellen. Dabei wendet sie sich ausdrücklich an interessierte Laien, etwa Politiker, Theologen oder Juristen, die sich nicht mit Spezialwissen herumschlagen möchten.

Ganz in diesem Sinne steigt Nüsslein-Volhard auch mit einem locker geschriebenen Überblick über die Erkenntnisse von Darwin, Mendel und Linné in das Thema ein und lässt so auf einen verständlichen, aber informativen Haupttext hoffen.

Weit gefehlt! Bereits auf Seite 43 geht die Grande Dame der Entwicklungsbiologie zur Genetik der *Drosophila* über – und damit ans Eingemachte. Keine Frage, die Taufliege, den meisten als ungebetener Gast auf dem Obstteller bekannt, hat Forscher vieles über das Entstehen mehrzelliger Organismen gelehrt. Doch es ist, als hätte die Autorin das eingangs gegebene Versprechen, dem Leser spezielles Wissen weit gehend zu ersparen, vergessen. So erklärt sie über die Paarregel-Gene »even-skipped« und »fushi-tarazu«, die eine wichtige Rolle bei der Segmentbildung des Insekts spielen: »Unter der Kontrolle der jeweils sieben Streifen der Gene even-skipped und fushi-tarazu entstehen schließlich 14 Streifen des Produkts des Gens der nächsten Stufe, engrailed, das sowohl von fushi-tarazu als auch von even-skipped aktiviert wird.« Was sollen Jurist und Theologin daraus lernen?

Hut ab vor dem, der das Buch nicht gleich zur Seite legt, sondern weiterblättert, um mehr über den Menschen zu erfahren. Aber im Gegensatz zur ausführlich besprochenen lästigen kleinen Fliege

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Michael Schünke, Erik Schulte, Udo Schumacher, Markus Voll, Karl Wesker

Prometheus LernAtlas der Anatomie

Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem

Thieme, Stuttgart 2004, 550 Seiten € 64,95

Dieses Werk ist der Versuch, die bisher in der Anatomie streng getrennten Lehrmaterialien »Atlas« und »Lehrbuch« zu vereinigen und das Ganze didaktisch möglichst nah an den Anforderungen des Präparierkurses zu orientieren.

Dieses Konzept ist aufgegangen. Der »Prometheus« stellt alles in den Schatten, was an Anatomie-Atlanten bisher auf dem Markt war, und schöpft dabei das Potenzial des Mediums Buch im Vergleich zu digitalen Informationsquellen voll aus. Die exakten und funktionell gut verständlichen Zeichnungen, gepaart mit den nötigen Zusatzinformationen im Text, die für maximale Verständlichkeit und Übersichtlichkeit sorgen, spiegeln eine didaktische Leistung wider, die sonst in medizinischen Lehrbüchern oft Mangelware ist.

Aus der Rezension von Johannes Pöppe

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	24

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen

hakt Nüsslein-Volhard den *Homo sapiens* samt allem, was daran interessieren könnte, auf nicht einmal 18 Seiten ab: von der Entscheidung »Bub oder Mädchen« über die Embryonalentwicklung bis hin zum Zusammenhang zwischen Genen und Krankheit. Wenig später, bei den aktuellen Themen wie Klonen, Designer-Babys und Stammzellen, hofft man vergeblich auf handfeste Aussagen.

Die Nobelpreisträgerin hat bei ihrem gut gemeinten Vorhaben glatt an der Zielgruppe vorbeigeschrieben. Kein Laie wird aus diesem Werk einen Gewinn ziehen. Und wer sich als Student mit *Drosophila*-Genetik beschäftigt, bevorzugt wohl ein echtes Lehrbuch.

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



METEOROLOGIE

Mojib Latif

Klima

Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main 2004. 128 Seiten, € 8,90

Das Klima ist prominenter Gegenstand der öffentlichen Debatte geworden: Hitzewellen und Überschwemmungen überfallen uns häufiger und heftiger als noch vor wenigen Jahrzehnten, Politiker streiten über die Wirksamkeit des Kyoto-Protokolls zum Klimaschutz. Damit ist es ein klassisches Sujet für ein Handbuch aus der Reihe »Fischer Kompakt«, die den Anspruch erhebt, den Laien aus dem Munde eines Experten kompakt und verlässlich über ein abgegrenztes Thema zu informieren. Mojib Latif ist ohne Zweifel ein solcher Experte: Er arbeitet als Professor am Institut für Meereskunde an der Universität Kiel und besitzt internationales Renommee als Klimaforscher.

In den ersten Kapiteln führt er uns zu den chemischen und physikalischen Grundlagen des Klimas. Nicht nur das Wetter, das heißt der momentane Zustand der Atmosphäre, ist wechselhaft, auch der über größere Zeiträume gemittelte Zustand, das Klima, schwankt im Laufe der Jahrhunderte und Jahrtausende. Deswegen steht seine Vorhersage mit Hilfe von Computern im Mittelpunkt des Interesses.

Im Folgenden beantwortet Latif die aktuellen Fragen: Was wissen Klimaforscher über die Ursachen der globalen Erwärmung, was prognostizieren sie für das kommende Jahrhundert, wozu dient das Kyoto-Protokoll, und bringt es überhaupt den erhofften Nutzen?

Gewisse Dinge möchte man noch genauer wissen. Wie stark wird das Gletschereis an den Polen künftig schmelzen, und wie hoch wird dann der Meeresspiegel steigen? In den folgenden Kapiteln zur Vertiefung klären sich viele dieser Ungewissheiten – geschickt hat Latif interessante Aspekte des Klimasystems ausgewählt. So erläutert er etwa das El-Niño-Phänomen, die Entstehung des Ozonlochs und den Klimaeffekt von Kondensstreifen.

Leider bleibt dabei die Verständlichkeit für den Laien auf der Strecke. Der Text erreicht streckenweise das Niveau einer einführenden Vorlesung über Klimaphysik. Wer von Spektralbändern und dem Strahlungshaushalt der Atmosphäre noch nie etwas gehört hat, wird die entsprechenden Absätze nur mühsam verstehen. Die Formulierungen sind oft nicht besonders anschaulich. Dass der Golfstrom vom Wind angetrieben wird, beschreibt der Autor als eine »von der Atmosphäre aufgezwungene Drehbewegung«. Auch schwankt die Ausführlichkeit stark. Während Latif auf zwei Seiten recht begreiflich macht, wie Wolken und Niederschlag entstehen, räumt er dem viel schwierigeren Thema »Klimamodelle« nicht mehr Platz ein, sondern weniger. Die Grafiken können solche Defizite nicht ausgleichen: Sie sind oft lieblos fabriziert, und man versteht sie kaum, ohne den Text zu lesen.

Lesern, die ein gerüttelt Maß an physikalischem Grundwissen mitbringen, bietet das Büchlein einen knappen Überblick auf der Höhe des aktuellen Forschungsstands. Wer aber eine leicht verständliche Einführung erwartet, wird den Band wohl bald enttäuscht aus der Hand legen.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.



PSYCHIATRIE

Martin Schmela

Vom Zappeln und vom Philipp

ADHS: Integration von familien-, hypno- und verhaltenstherapeutischen Behandlungsansätzen

Carl-Auer-Systeme, Heidelberg 2004. 232 Seiten, € 22,95

Die Aufmerksamkeits- und Aktivitätsstörung im Kindes- und Jugendalter, auch ADD *(attention deficit disorder)*, ADHD *(attention deficit hyperactivity disorder)* oder HKS (hyperkinetisches Syndrom) genannt, ist das Phänomen unserer Zeit. Eltern sind in ihrem Erziehungsverhalten sehr unsicher geworden; den Kindern fehlen Raum, Gelegenheit und Anregung für selbsterfahrendes Spielen, der Straßenverkehr und die Fülle medialer Angebote erfordern ein gestiegenes Maß an Konzentration.

Aus diesen und anderen Gründen ist in den letzten Jahrzehnten die Zahl der als aufmerksamkeits- und aktivitätsgestört diagnostizierten Kinder (und neuerdings auch Erwachsenen) exponentiell gestiegen – und mit ihr die Neigung vieler Eltern und auch Therapeuten, die unterschiedlichsten kindlichen Störungen diesem Phänomen zuzuordnen. Alle vier großen psychotherapeutischen Schulen – die psychodynamische, die verhaltenstherapeutische, die humanistische und die systemische Richtung – haben Behandlungskonzepte entwickelt, und die Zahl der Publikationen ist inzwischen kaum noch zu überschauen.

Martin Schmela, Diplompsychologe sowie Politik- und Geschichtswissenschaftler, versucht nun in seinem Buch verschiedene dieser Ansätze zu integrieren. Auf der Basis seiner Erfahrungen in einem Beratungs- und Behandlungszentrum für verschiedene Jugendhilfeeinrichtungen und neuerdings in einer kinder- und jugendpsychiatrischen Ambulanz setzt er sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen der verhaltenstherapeutischen und der systemischen Richtung auseinander. Anschließend schildert er eine Fülle von psychotherapeutischen Vorgehensweisen in der Behandlung von ADHD-Kindern und zeigt, wie sich die unterschiedlichen Ansätze miteinander verbinden lassen.



Diese Darstellung gelingt besonders gut in vielen Fallbeispielen aus seinem Erfahrungsbereich mit Kindern, die neben einem Aufmerksamkeitsdefizit- und Hyperaktivitätssyndrom noch zahlreiche weitere psychische Störungen und Auffälligkeiten zeigen. Mit hoher Sensibilität für die Nöte der Kinder und ihrer Eltern greift er auf einen großen Erfahrungsschatz von Interventionen zurück. So kommt ein anregendes kindertherapeutisches Praxisbuch zu Stande.

Die selbstgestellte Aufgabe »Integration von familien-, hypno- und verhaltenstherapeutischen Behandlungsansätzen« erfüllt der Autor nicht – und versucht es auch gar nicht erst. Vielmehr regt er im Sinne des Eklektizismus »Mischung(en) aus verhaltens- und hypnosystemischen Elementen« an, die bei einem von Fall zu Fall variierten Mischungsverhältnis »im Sinne eines prinzipiellen ›Sowohl-als-auch‹ sehr wirkungsvolle Zusätze sein können«.

Tatsächlich ist die Idee »reiner« schulenorientierter Therapiekonzepte überholt und wird derzeit eigentlich nur noch vom »Wissenschaftlichen Beirat Psychotherapie« verfolgt. Wissenschaftliche Studien aus den angelsächsischen Ländern zeigen, wie wenig dogmatisch dort sowohl Praktiker als auch Wissenschaftler in ihrer Arbeit vorgehen.

Allerdings: Ein Modell der Behandlung von Kindern mit ADHD-Symptomatik zu erarbeiten, das die wichtigen und erfolgreichen therapeutischen Ansätze der verschiedenen Schulen zu einer einheitlichen Psychotherapie verbindet, ist beim derzeitigen Stand der Wissenschaft wohl schlicht unmöglich. Zu unterschiedlich sind die Grundannahmen zum Störungs- und Krankheitsbegriff sowie zu den Ursachen psychischer Auffälligkeiten und damit auch die therapeutischen Leitlinien. Ein Versuch, sie unter einen Hut zu bringen, würde allenfalls zu Verwirrung im Kopf des Therapeuten und seinen Äußerungen gegenüber dem Kind und seinen Angehörigen führen – was einem Behandlungserfolg sehr abträglich wäre.

Dem heutigen Stand der Wissenschaft scheint eher angemessen, wenn ein Vertreter einer der vier großen Schulen von der sicheren Basis seiner Überzeugung aus sein therapeutisches Handeln für Interventionen aus anderen therapeutischen Richtungen öffnet, die sich in sein eigenes, stimmiges Konzept einordnen lassen. Das gilt zum Beispiel für

Ein »prinzipielles Sowohl-als-auch« ist besser als die reine Lehre

das von Schmela ausführlich referierte TOP-Programm zur Behandlung von Kindern mit ADHD-Symptomatik, das viele systemische Elemente in eine verhaltenstherapeutische Grundlage integriert. Umgekehrt steht das ebenfalls erwähnte Konzept der Anorexiebehandlung von Kurt Ludewig auf systemischer Basis, verwendet jedoch verhaltenstherapeutische Mittel, um zunächst eine Gewichtszunahme zu erreichen. Auch das von mir und meinen Kollegen entwickelte Viersener Modell stationärer Kinder- und Jugendpsychiatrie ist als systemtherapeutischer Rahmen angelegt, innerhalb dessen vielfältige, im Einzelfall passende Interventionen aus anderen Therapieschulen möglich und erwünscht sind.

Auch wenn Schmela sein im Untertitel gegebenes Versprechen nicht einlöst: Sein Buch ist eine wertvolle Zusammenstellung zahlreicher Ansätze zur Behandlung von Kindern mit ADHD-Symptomatik, das dem Praktiker viele Anregungen für eigenes Nach-Denken und Handeln gibt.

Wilhelm Rotthaus

Der Rezensent war Leiter des Fachbereichs Psychiatrie und Psychotherapie des Kindes- und Jugendalters der Rheinischen Kliniken Viersen und ist Arzt für Kinder- und Jugendpsychiatrie in Bergheim bei Köln.

Das Frauenversteher-Spiel

Wer die geheimsten Gedanken einer Frau erraten kann, gewinnt ihre Gunst? Aussichtslos. Schnöde Taktik mit etwas Wahrscheinlichkeitsrechnung führt zum Ziel.

Von Christoph Pöppe

Fünfzig Männer wetteifern um die Gunst einer schönen Frau. Ein großes Turnier wird ausgefochten, bei dem nacheinander alle Kandidaten bis auf drei aus dem Rennen geworfen werden. Erst an dieser Stelle des Spiels geht es um die Frage, wie gut eigentlich jeder der drei Männer zu der begehrten Frau passt. Nicht dass sie einen von ihnen auswählen dürfte; aber immerhin soll der Sieger der Endausscheidung derjenige sein, der die Gedanken der Dame am besten erfühlen kann.

Die Rede ist nicht von einem Märchen oder einem mittelalterlichen Ritterspiel. Es geht auch nicht um ein Königreich. Der Gewinner darf sich nur glücklich schätzen, einen Abend mit der Schönen zu verbringen. Das ist das »Singled Out Game«, das der Musik-Fernsehsender MTV von 1995 bis 1997 in seinem amerikanischen Programm spielte. Die Moderatorin Jenny McCarthy und ihre Nachfolgerin Carmen Electra gaben der Dating-Show ein Gesicht, bevor sie als Serienheldinnen in »Baywatch« zu weit größerer Berühmtheit kamen. Um die politische Korrektheit zu wahren, gab es dasselbe Spiel auch mit umgekehrter Rollenverteilung: Fünfzig Frauen durften sich um einen attraktiven Mann reißen. Eine deutsche Kopie der Sendung lief 1996/97 bei Sat. 1 unter dem Namen »Sommer sucht Sprosse« (Bild rechts).

Die Vorrunden dienen vornehmlich zur Belustigung des Fernsehpublikums; da man sich ohnehin lächerlich macht, sind besondere taktische Fähigkeiten nicht gefragt. Aber die Schlussrunde! Der Moderator stellt der Frau eine Ja-Nein-Frage. Die Frau notiert ihre Antwort an verborgener Stelle und schweigt. Die drei Finalisten – nennen wir sie Arthur, Benjamin und Carsten – äußern nacheinander ihre Vermutung darüber, ob die Frau mit »Ja« oder »Nein« geantwortet hat; sie können also nur richtig oder falsch raten. Dann wird die Antwort aufgedeckt und das Frage-Antwort-Spiel wiederholt. Sieger der Show ist, wer als Erster fünf richtige Antworten gegeben hat. Wenn mehr als ein Kandidat auf einmal dieses Ziel erreicht, wird ausgelost.

Teilnehmer an dem Spiel sollten eine elementare Weisheit beherzigen: Frauen verstehen ist aussichtslos – jedenfalls in dieser Situation. Der Mathematiker Kennan Shelton vom Rhodes College in Memphis (Tennessee) vermutet, dass die Frau ihre Antwort durch einen schlichten Münzwurf oder etwas ähnlich Zufälliges bestimmte. Jedenfalls hatten weder er noch die Herren auf der Bühne irgendeine Vorstellung von ihren geheimen Gedanken. Was kann Mann tun, um unter diesen Umständen noch gut abzuschneiden?

Keinen Sinn suchen!

Darauf hat Shelton einige interessante Antworten zu bieten. Die erste: Arthur kann eigentlich nichts anderes tun, als seinerseits eine Münze zu werfen. Aber Benjamin hat ihm gegenüber einen kleinen Vorteil: Er weiß, was Arthur gesagt hat. Davon weiß er zwar nicht besser, was die Frau denkt – erstens ist das sowieso aussichtslos, und zweitens ist Arthur auch nur ein Mann –, aber er kann diese Kenntnis zu taktischem Verhalten nutzen. Das gilt in noch höherem Maße für Carsten. Im Endeffekt sieht es schlecht aus für Arthur, vor allem wenn Benjamin und Carsten kooperieren.

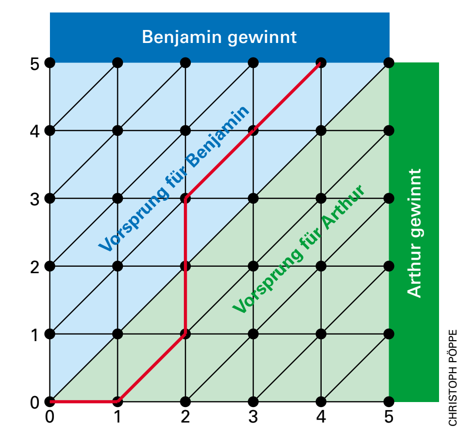
Betrachten wir zur Einstimmung die vereinfachte Situation mit nur zwei Helden – Carsten ist für diese Überlegung aus dem Spiel. Arthur rät irgendwie. Benjamin hat nun mehrere Möglichkeiten: Er sagt dasselbe wie Arthur, er sagt das Gegenteil, oder er macht seine Antwort ebenfalls vom Zufall abhängig.

Alle drei Strategien scheinen nicht besonders attraktiv. Wenn Benjamin Arthur kopiert, erreichen sie irgendwann im Gleichschritt die fünf Richtigen und damit den Losentscheid. Wenn er regelmäßig Arthur widerspricht, hängt sein Vorankommen nur vom Zufall ab, ebenso wenn er selbst unabhängig von Arthur eine Münze wirft. In allen drei Fällen beträgt seine Gewinnchance genau 50 Prozent.

Benjamin kann sich jedoch durch einen einfachen Trick einen beträchtlichen Vorteil verschaffen. Solange er in seiner Punktzahl hinter Arthur liegt oder allenfalls gleichauf, widerspricht er ihm. Sowie er aber in irgendeinem Stadium des Spiels mehr Punkte hat als Arthur, wiederholt er ab da brav dessen Antworten. Damit rettet Benjamin einen einmal zufällig erreichten Vorsprung über den Rest des Spiels hinweg bis zum unvermeidlichen Ende.

Bezeichnen wir mit x die Differenz »Arthurs Punktzahl minus Benjamins Punktzahl«. Am Anfang ist $x = 0$, und wenn beide Spieler naive Strategien verfolgen, dann wird in jedem Spielzug x um eins größer (Arthur richtig, Benjamin falsch), um eins kleiner (Arthur falsch, Benjamin richtig) oder bleibt unverändert (beide antworten gleich richtig oder gleich falsch). x steigt oder fällt jeweils mit Wahrscheinlichkeit 1/4.

Damit ist die Bewegung von x das, was die Statistiker einen *random walk* (»Irrfahrt«) nennen. Wie beim Torkeln eines Betrunkenen wird zwar die Verteilung der Zufallsvariablen mit der Zeit immer breiter, das heißt, der Wert von x wird immer unsicherer, aber sie bleibt »gerecht«, nämlich symmetrisch um die



Das ungleiche Ratespiel von Arthur und Benjamin als *random walk* in einem Gitter: Nach der vierten Frage hat Benjamin zufällig einen Vorsprung, den er bis zum Schluss hält, indem er Arthurs Antworten wiederholt.

Null verteilt. Ein Vorsprung für den einen ist genauso wahrscheinlich wie einer für den anderen.

Durch Benjamins hinterhältigen Trick bleibt allerdings x auf –1 fixiert, wenn es irgendwann im Laufe der Zeit diesen Wert erreicht. Das ist in der Sprache der Statistiker ein »*random walk* mit absorbierender Grenze«. Ein Teilchen wandert zufällig die x-Achse entlang, bleibt aber kleben, sowie es an die Wand gerät, die bei –1 aufgestellt ist.

Für diese Fälle hat die Statistik eine traurige Nachricht. Auf die Dauer bleibt mit Wahrscheinlichkeit 1 jedes Teilchen kleben. Das ist der Fluch des Glücksspielers, der auch dann zuschlägt, wenn das Glücksspiel an sich fair ist, also in jeder Runde mit gleicher Wahrscheinlichkeit einen Euro Gewinn wie einen Euro Verlust beschert: x ist in diesem Fall der Geldvorrat des Spielers, und der nimmt irgendwann rein per Zufall den Wert null an, wenn der Spieler nicht rechtzeitig aufhören kann.


SAT1 / LINTNER

»Sommer sucht Sprosse« vom 13. September 1997 bei Sat.1: Drei Kandidaten wetteifern im Frage-und-Antwort-Spiel um Petra, die ehemalige Vize-»Miss Österreich«.

Für unser Frauenversteher-Spiel bedeutet das: Benjamin hat einen Vorteil, der Arthur keine Chance ließe, wenn das Spiel beliebig lange dauern würde. Es dauert aber nur so lange, bis der erste Kandidat fünf Punkte erreicht. Deswegen ist Benjamins Vorteil auch nicht erdrückend, aber immer noch erheblich.

Um ihn wirklich auszurechnen, trägt man alle möglichen Spielstände in ein Koordinatensystem ein. Arthurs Punktzahl wird nach rechts abgetragen, Benjamins nach oben (Bild links). Wenn Arthur richtig rät und Benjamin nicht, ist es ein Schritt nach rechts, im umgekehrten Fall einer nach oben, wenn beide richtig raten, geht es nach schräg oben, und wenn sie beide falsch liegen, passiert gar nichts: Es ist so, als ob diese Frage nie gestellt worden wäre. Diesmal verläuft also der *random walk* über die Gitterpunkte nicht einer Linie (der x-Achse), sondern einer Ebene. Wenn der Weg des Punkts, der den Spielverlauf beschreibt, nach oben über die Winkelhalbierende hinausgeht, kann Benjamin ihn durch fleißiges Nachplappern in »seiner« Hälfte halten, bis er die Gewinnlinie in seinem Sinne durchstößt.

Um nun die Gewinnwahrscheinlichkeit für Benjamin zu berechnen, bestimmt man zunächst, wie viele denkbare Wege durch jeden der Gitterpunkte verlaufen. Das geht im Prinzip ganz einfach, in der Praxis allerdings etwas mühsam: Ein Gitterpunkt ist von seinem linken, seinem unteren und seinem linken unteren Nachbarn in jeweils einem Schritt erreichbar. Also ist die Anzahl der Wege, die bis zu diesem Gitterpunkt führen, gleich der Summe der Anzahlen der Wege, die zu seinen unmittelbaren Vorgängern führen; und die hat man einen Rechenschritt vorher schon bestimmt. So arbeitet man sich, von links unten beginnend (alle Wege fangen bei (0, 0) an), durch das Gitter hindurch.

Am Ende einer langen Rechenarbeit steht eine überraschend einfache Formel. Arthurs Gewinnchance ist genau 1/2, wenn eine einzige richtige Antwort zum Gewinnen ausreicht. Mit jedem zusätzlich geforderten Punkt sinkt seine Chance um den Faktor $(1-1/(2k))$, wobei k die Nummer des Punkts ist. Ist also das Spiel nach zwei richtigen Antworten zu Ende, so bleibt Arthur noch eine Chance von $(1/2)\cdot(1-1/(2\cdot 2))=3/8$, mit drei Antworten sinkt sie auf 5/16, und mit fünf zu erreichenden Punkten bleibt ihm noch ein knappes Viertel: 63/256.

Ein flotter Dreikampf mit wechselnden Bündnissen

Was geschieht, wenn nun der dritte Kandidat wieder hinzutritt? Carsten verfügt von allen drei Männern über die meiste Information, also sollte er auch die günstigste Position haben. Das stimmt auch, allerdings ist sein Vorteil überraschend gering und auch nur dann realisierbar, wenn er nicht seinen unmittelbaren Vorteil sucht.

Allgemein gilt: Der mit der Minderheitsmeinung (wenn es einen gibt) ist stets im Vorteil. Denn wenn er gewinnt, hat er von seinem einen Punkt mehr als die beiden anderen, die dann immer noch gegeneinander konkurrieren müssen. Wenn also Arthur und Benjamin sich einig sind, wird Carsten die Gegenposition beziehen. Wenn sie einander widersprechen, bleibt Carsten nichts anderes übrig, als einem der beiden beizupflichten und diesen dadurch mit in die ungünstige Mehrheitsposition zu reißen.

Wenn Benjamin Arthur widerspricht, ist Carsten sauer, weil Benjamin ihm die schöne Minderheitenposition verdorben hat. Also wird er vielleicht Benjamin beipflichten und ihn so an seinem Schaden teilhaben lassen – aus Rache oder zumindest als Drohung, damit Benjamin fortan gefügiger spielt. Die Drohung geht jedoch ins Leere. Benjamin kann sich nämlich überlegen, dass es für ihn, einerlei wie Carsten spielt, ▷

PREISRÄTSEL

Patchworkfamilie

Von Roland Mildner

ULI LICHT
CILLI LICHT

Uli Licht und seine Frau Cilli bemerken, dass ihre Namen eine besondere Eigenschaft haben. Zeichnet man die Buchstaben beider Vor- und Nachnamen im eckigen Stil auf ein kariertes Papier und schneidet sie aus (siehe Skizze rechts oben), dann lassen sich alle Buchstaben lückenlos und überdeckungsfrei zu einem einzigen Quadrat zusammenlegen.

Wie sieht eine Lösung aus?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf schwebende Kugelschreiber »Pen Ultimate«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 14. Juni 2005, eingehen.

Lösung zu »Überholfreude« (April 2005)

Die Reihenfolge im Ziel ist BADC. Das heißt, Carl kommt als Erster ins Ziel, gefolgt von Dora, Alf und Bea.

Alle Permutationen von ABCD ergeben 24 mögliche Zieleinläufe. Da jeder Läufer genau sechsmal einen anderen überholt und jeder eine ungerade Anzahl von Malen überholt wird, muss sich die Position jedes Läufers um eine ungerade Anzahl an Plätzen verändern. Nur bei vier der 24 denkbaren Zieleinläufe ist dies auch tatsächlich der Fall: DCBA, BCDA, DABC und BADC.

Hartmut Fenner aus Hamburg schloss davon drei durch Widerspruch aus:

Bei DCBA rückt Alf drei Plätze vor. Da er selbst sechsmal überholt, kann er nur dreimal selbst überholt werden; diese drei Möglichkeiten werden bereits ausgeschöpft, indem jeder andere alle drei Mitläufer überholt. Dora hingegen verliert drei Plätze. Da auch sie sechsmal selbst überholt, wird sie selbst neunmal überholt, also von jedem der anderen genau dreimal. Dies kann nur sein, wenn sie ihrerseits jeden anderen zweimal überholt. Das widerspricht der Voraussetzung, dass Alf von jedem nur einmal überholt wird.

Auch bei BCDA gewinnt Alf drei Plätze, überholt also sechsmal und wird dreimal überholt. Er ist somit an neun Überholvorgängen beteiligt. Da jeder Läufer sechsmal überholt, gibt es insgesamt 24 Überholvorgänge und damit 15 ohne Alf. Bea, Carl und Dora haben am Ziel noch ihre ursprüngliche Reihenfolge. Jeder überholt also jeden der beiden anderen genauso oft, wie er selbst von ihnen überholt wird. Also ist die Anzahl der Überholvorgänge ohne Alf gerade: Widerspruch.

Für DABC verläuft die Argumentation analog. Dora verliert drei Plätze, überholt sechsmal und wird neunmal überholt. Sie ist also an 15 Überholvorgängen beteiligt und an neun nicht. Diesmal behalten Alf, Bea und Carl ihre Reihenfolge, und die Anzahl der Überholvorgänge ohne Beteiligung von Dora muss gerade sein. Neun ist aber ungerade.

Für BADC genügt es nun, ein Lösungsbeispiel zu finden (der jeweils Überholende ist rot markiert): ABCD; BCDA; CDAB; DABC; ABCD; ACDB; ADBC; DBAC; BADC; ABDC; BADC; BACD; BADC.

Mit Hilfe des Computers lassen sich insgesamt 47969 Varianten dieses Zieleinlaufs finden.

Die Gewinner der drei Taschenlampen »Everlight« sind Thomas Fehsenfeld, Kaufbeuren; Falk Lehmann, München; und Simon Beier, Rabenau.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ von Vorteil ist, Arthur zu widersprechen. Dagegen ist es für Carsten sinnvoll, seine Rachegelüste zu unterdrücken und Arthur beizupflichten, womit er Benjamin einen »unverdienten« Vorteil verschafft. Diese Strategienkombination »Benjamin egoistisch, Carsten nachsichtig« ist ein so genanntes Nash-Gleichgewicht. Das heißt, keiner der Spieler kann sich durch einseitiges Abweichen von seiner Haltung einen Vorteil verschaffen.

Wenn schließlich beide die Möglichkeit in Betracht ziehen, unabhängig von den anderen ihre Spielzüge nach dem Zufall zu wählen, gibt es zwei Nash-Gleichgewichte. All das kann man nicht mehr durch geschicktes algebraisches Rechnen belegen, sondern muss die verschiedenen Möglichkeiten vom Computer auszählen lassen.

Der späte Sieg des Einfühlungsvermögens

Und wenn nun Arthur doch ein Frauenversteher ist? Nicht dass er der schönen Unbekannten jeden Gedanken von den Augen ablesen könnte. Aber nehmen wir an, seine Chance, ihre Antwort richtig zu erraten, ist größer als 1/2; nennen wir sie p. In unserem Diagramm sind dann Schritte nach rechts wahrscheinlicher als solche nach oben. Wieder gilt, dass Arthurs Chance umso schlechter steht, je länger das Frage-und-Antwort-Spiel dauert. Für den Grenzwert unendlich vieler Fragen lässt sie sich durch eine einfache Formel ausdrücken: Für $p > 1/2$ gewinnt Arthur mit Wahrscheinlichkeit $2 - 1/p$, oder eben etwas mehr, wenn es nur endlich viele Fragen sind.

Dieser Wert ist genau dann gleich 1/2, wenn $p = 2/3$ ist. Was lernen wir daraus? Man muss schon ein ziemlich guter Frauenversteher sein – zwei Drittel aller Gedanken richtig erraten –, um den Vorteil des dumpfsinnigen, aber taktisch geschickten Nachplapperers aufwiegen zu können. ◁

AUTOR UND LITERATUR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

The singled out game. Von Kennan Shelton in: Mathematics Magazine, Bd. 78, Heft 1, S. 15, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Rätselhafte Supernova-Explosionen

Die gewaltigen Kataklysmen, mit denen schwere Sterne spektakulär verglühen, haben sich als hochkomplexe Vorgänge entpuppt. Selbst die aufwändigsten Simulationsrechnungen konnten ihnen nicht alle Geheimnisse entreißen

NASA / ESA / JHU, RAVI SANKRIT UND WILLIAM P. BLAIR

WEITERE THEMEN IM JULI

Das Gehirn und sein Marihuana

Hirneigene Cannabinoide sind an der Empfindung von Schmerz, Angst oder Hunger beteiligt. Forscher nehmen sie zum Vorbild für neue Medikamente

Rettung vor der Spam-Flut

Gegen die Zeit und Geld fressenden unerwünschten Massen-E-Mails gibt es wirksame Gegenwehr; sie müsste nur weltweit praktiziert werden



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN



HUNTER G. HOFFMAN

Virtuelle Realität

Alles andere als Computerspiele: VR-Programme sollen Brandopfer von Schmerzen ablenken, Phobikern im Kampf gegen die Angst helfen und Terroropfer unterstützen, das Erlebte zu verarbeiten

Dinosaurier der Arktis

Die Herrscher des Erdmittelalters tummelten sich auch jenseits des Polarkreises: zum Beispiel im Norden Alaskas. Offenbar arrangierten sich die gigantischen Reptilien dort sogar mit dem winterlichen Dauerdunkel



KAREN CARR